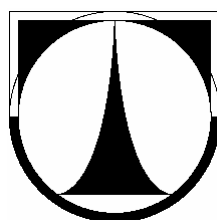




TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra strojírenské technologie



Sledování krystalizace hliníkových slitin pod tlakem ***Monitoring crystalization of aluminium casting under*** ***pressure***

[Diplomová práce]

**A N O T A C E****TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI****Fakulta strojní****Katedra strojírenské technologie****Oddělení strojírenské metalurgie**

Studijní program :	M2301 – Strojní inženýrství
Diplomant :	Jan Maděra
Téma práce :	Sledování lisování taveniny ze slitin hliníku v tvarovém nástroji Monitoring press meeting from aluminium alloys into formative instrument
Číslo DP :	KSP – SM – 558
Vedoucí DP :	Prof. Ing. Iva Nová, CSc. – TU v Liberci
Konzultant :	Ing. Iva Nováková, Ph.D.

Abstrakt:

Tato diplomová práce pojednává o technologii lití hliníkových slitin pod tlakem a sledování vlivu tlaku na krystalickou strukturu konkrétních odlitků. Je rozdělena do dvou základních částí. V první teoretické části je popsána krystalizace slitin, přehled slitin hliníku a nové metody výroby odlitků ze slitin hliníku. V druhé praktické části je provedeno metalografické hodnocení vzorků pomocí obrazové analýzy softwaru NIS ELEMENTS AR, z mechanických vlastností byla stanovena tvrdost sledovaných slitin hliníku.

Abstract:

This thesis deals with the technology of the squeeze casting casting of aluminium alloys and observing the pressure influence on the crystalline structure of particular castings. The thesis is divided into two main parts. In the first theoretical part the crystallization of alloys, the general overview of aluminium alloys and new technologies used for the castings produced from aluminium alloys are described. Metallography rating of specimens by means of the image analysis NIS ELEMENTS AR software was carried out in the second practical part. Of the mechanical properties the strength of the tested aluminium alloys was evaluated.



Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 27. května 2010

.....

Jan Maděra
Heydukova 396
537 01 Chrudim



Poděkování

Děkuji své vedoucí diplomové práce paní prof. Ing. Ivě Nové, CSc. a konzultantce Ing. Ivě Novákové za cenné rady a připomínky, které přispěly k jejímu vytvoření.

Seznam použitých zkratk a symbolů

σ	povrchové napětí na hranici tavenina - zárodek	[N.m ⁻¹]
ΔG	změna Gibbsovy energie	[kJ]
ΔH [J]	změna entalpie	[J.mol ⁻¹]
ΔT	podchlazení	[°C]
HB	tvrdost podle Brinella	[-]
R _m	mez pevnosti v tahu	[MPa]
T _L	teplota likvidu	[K]
T _S	teplota solidu	[K]
T	absolutní teplota	[K]
T ₀	teoretická teplota krystalizace	[K]
ρ [kg.m ⁻³]	hustotu taveniny	[kg.m ⁻³]
L_{kr}	latentní krystalizační teplo	[J.kg ⁻¹]
N	počet atomů v kovu	[-]

OBSAH

1. ÚVOD	
2. REŠERŠNÍ ČÁST PRÁCE.....	8
2.1 Charakteristika hliníku a jeho slitin.....	8
2.1.1 Čistý hliník.....	11
2.1.2 Rozdělení slitin hliníku.....	12
2.2 Modifikace a očkování slitin hliníku.....	17
2.3 Faktory hodnotící použitelnost slévárenských slitin a odlitků.....	20
2.4 Tepelné zpracování slitin hliníku.....	20
2.5 Vliv tlaku na krystalizaci hliníku a jeho slitin.....	22
2.6 Metody lití s krystalizací pod tlakem.....	26
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE.....	30
3.1 Použité zařízení.....	31
3.1.1 Charakteristika pracovního stroje.....	33
3.2 Charakteristika použitých slévárenských slitin.....	34
3.3 Metodika výroby tvarových dílů.....	36
3.3.1 Stanovení stažení.....	37
3.3.2 Výpočet tlaku v dutině raznice.....	38
3.4 Stanovení teploty tání při zvýšeném tlaku.....	39
3.5 Hodnocení struktury hliníkových odlitků.....	41
3.6 Zkoušky tvrdosti hliníkových slitin.....	52
4. DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	59
5. ZÁVĚR.....	61
6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	63

1. ÚVOD

V současné době je věnována značná pozornost výrobě kvalitních konstrukčních dílů. Mezi tyto díly se také řadí odlitky ze slitin hliníku, které mají značné uplatnění v automobilovém průmyslu. Slitiny hliníku, které se nejčastěji vyrábí vysokotlakým litím, nevykazují potřebnou hutnost, naopak obsahují značné množství drobných pórů i navzdory velmi dobré hladkosti povrchu a rozměrové přesnosti. Zvyšování kvality takto vyráběných odlitků je řešeno např. použitím vakuované dutiny slévárenské formy nebo lokální squeeze casting, tak jak používá ŠKODA Auto Mladá Boleslav. I přes toto zkvalitnění výroby vysokotlakých odlitků ze slitin hliníku byly v minulosti hledány nové výrobní metody. K těmto metodám se řadí např. lití s krystalizací pod tlakem (squeeze casting) nebo metody lití v polotuhém stavu, které jsou v zahraničí označovány např. Semi solid metal, Rheocasting, New Rheocasting, Semi solid rheocasting, atd. Takto vyráběné odlitky vykazují značnou kompaktnost. V zahraničí jsou tyto metody používány při výrobě disků kol, pístů, atd. Uplatnění těchto metod je úzce spojeno se strojním vybavením a potřebnou kovovou formou. V případě metody lití s krystalizací pod tlakem je nutný tváření lis a slévárenská forma, resp. raznice s tvarovým razníkem. Při použití metod lití v polotuhém stavu je to tlakový stroj s formou a indukční zařízení pro ohřev válcového polotovaru.

V současné době se litím slitin hliníku krystalizací pod tlakem zabývají pracovníci Katedry strojírenské technologie, FS – TU v Liberci.

S touto metodou také souvisí řešení mé diplomové práce, které je na téma: „Sledování krystalizace slitin hliníku pod tlakem“.

2. REŠERŠNÍ ČÁST PRÁCE

V této části se zaměřím na vlastnosti hliníku a jeho slitin. Budu porovnávat vlastnosti čistého hliníku se slitinami hliníku a sledovat jejich technologické parametry a krystalizaci pod tlakem.

2.1. Charakteristika hliníku a jeho slitin

Čistý hliník je stříbřitě šedý kov, velmi lehký, dobrý vodič elektrického proudu a také dobře tepelně vodivý. Na vzduchu se pokrývá tenkou nevodivou vrstvou oxidu hlinitého Al_2O_3 , která ho chrání před dalšími vlivy ovzduší. Hliník lze snadno tvářet za studena i za tepla lisováním, kováním, tažením nebo válcováním.

V přírodě se lze s hliníkem setkat vzhledem k jeho silné reaktivitě v podstatě pouze v podobě sloučenin. V zemské kůře patří k nejrozšířenějším prvkům. Tvoří přibližně 8 % zemské kůry. V mořské vodě je oproti tomu koncentrace hliníkových sloučenin velmi nízká.

Rudy pro výrobu hliníku

Hornin a minerálů obsahujících hliník je v přírodě mnoho. Většina z nich se ale nevyskytuje v dobyvatelném množství. Dnes jsou prakticky jedinou dobyvatelnou rudou hliníku bauxity, což jsou horniny složené většinou z Al_2O_3 s příměsí znečišťujících sloučenin železa, křemíku a dalších. Bauxity se těží v povrchových dolech.

Použití hliníku a jeho slitin

Hliník se používá nejen ve velkém množství průmyslových oborů, ale i ve zdravotnictví, farmacii a kosmetice. Pro své vlastnosti má velké využití ve strojírenství, dopravě, chemii a stavebnictví.

Při výrobě automobilů je jeho použití stále častější, protože hliník je 3x lehčí než ocel. Nelze ho sice použít na všechny součásti, ale i tak snižuje jejich hmotnost aut o významné procento. Provoz je při použití hliníku ekonomičtější případně i rychlejší. K nevýhodám patří, že hliník je vzhledem k vysoké energetické náročnosti výroby dražší než ocel.

Ve stavebnictví se používají hliníkové fólie jako tepelná izolace, v potravinářství jako nejrůznější druhy obalů. V elektrotechnice se používá hliník jako vodič, i když dnes se často nahrazuje mědí.

Ve stavebnictví a průmyslu se pro konstrukce nebo pro výrobu spotřebního zboží používají častěji různé slitiny hliníku než hliník v čisté podobě. Nejdůležitějšími vlastnostmi slitin jsou malá hmotnost, dobré mechanické vlastnosti, odolnost proti korozi (pokud slitina neobsahuje měď), nemagnetičnost a dobrá obrobitelnost.

Výroba hliníku

Hliník se v současné době vyrábí z bauxitu – primární výroba a z recyklovaného hliníku – sekundární výroba.

Primární výroba - průmyslově se hliník vyrábí od konce 19. století. I když je tento kov obsažen ve stovkách minerálů a hornin, získává se dnes prakticky pouze z bauxitů. Název je odvozen ze jména naleziště Les Baux ve Francii. Největší zásoby bauxitu jsou v Jižní Americe, Austrálii a Africe. Ze 4 tun bauxitu se vyrobí průměrně 1 tuna hliníku.

Dnešní výroba hliníku z bauxitu má 2 fáze. První je výroba čistého Al_2O_3 působením alkálií, druhou fází je elektrolýza Al_2O_3 , kdy vzniká kovový hliník.

Al_2O_3 se nejčastěji vyrábí „Bayerovou metodou“, která je vhodná především pro čisté bauxity s obsahem SiO_2 do 5 %. Pro větší obsahy SiO_2 je vhodnější spékací metoda.

Elektrolýza probíhá v elektrolyzních pecích, kde se do roztaveného kryolitu postupně přidává Al_2O_3 . Při následném rozkladu se na katodě vylučuje hliník, na anodě vzniká kyslík, který reaguje s uhlíkem v elektrodě. Při této reakci vzniká oxid uhelnatý nebo uhličitý. Vše probíhá při teplotě kolem 950°C .

Alternativní metodou výroby hliníku z Al_2O_3 je karbotermická redukce. Nevýhodou je vyšší teplota až 2000°C , vysoký tlak par a možnost tvorby karbidů a oxikarbidů. Sekundární výroba (cz.prefa.com)

Sekundární výroba hliníku - se provádí na základě recyklace již použitého hliníku. Výrobní náklady představují zhruba 5 % nákladů na výrobu primárního.

Některé firmy používají pro svou výrobu až 90 % sekundárního hliníku např. výrobky PREFA (střešní krytina a okapy).



Obr. 2.1 Těžba bauxitu v povrchovém dole [14]



Obr. 2.2 Vzorek bauxitu [14]

Největší a nejrozšířenější uplatnění má hliník ve formě slitin. Velmi používaná je slitina s hořčíkem, mědí a manganem, známá pod názvem dural. Oproti samotnému hliníku je mnohem pevnější a tvrdší, přitom si zachovává nízkou hmotnost. Dural je i velmi odolný proti korozi. Tyto jeho vlastnosti umožňují použití v leteckém a automobilovém průmyslu. Slitinám hliníku pro slévárenské účely je věnována níže uvedená samostatná kapitola.

Současně také existují sloučeniny hliníku, velmi důležitou sloučeninou hliníku je oxid hlinitý Al_2O_3 . Vyrábí se v řadě modifikací, podle účelu, ke kterému má být použit. Může mít velmi odlišné fyzikálně chemické vlastnosti. Krystalický Al_2O_3 se nazývá korund. Uměle vyrobený má řadu praktických uplatnění – brusivo, leštící

prášky, ložiska do přístrojů (hodinky), optické přístroje, v laserové technice, šperkařství.

Jinou modifikací je keramika, kde Al_2O_3 lze zpracovat do jakéhokoliv tvaru s vysokou pevností a lomovou odolností. Takto zpracovaný materiál se pro svou tvrdost a oteřuvzdornost používá v přesných přístrojích na namáhaných místech. Vzhledem k tomu, že je bioinertní, má široké využití ve zdravotnictví především při výrobě kloubních náhrad.

2.1.1 Čistý hliník

Hliník byl objeven v roce 1825 a má atomové číslo 13, vyznačuje kubickou plošně centrovanou mřížkou K12, proto má hliník i jeho slitiny dobré plastické vlastnosti jak za tepla, tak i za studena. Jeho skluzové roviny jsou ve tvaru $(111)_a$, a skluzové směry $\langle 110 \rangle_a$. V tabulce 2-1 jsou uvedeny hodnoty fyzikálních vlastností hliníku a v tabulce 2-2 hodnoty teplotní roztažnosti hliníku v závislosti na teplotě.

Tabulka 2-1 Některé fyzikální vlastnosti hliníku [14]

Vlastnosti	Hodnoty
Mřížka	K12
Parametr mřížky	$a = 0.404958 \text{ nm}$
Hustota	2.6989 g.cm^{-3} (při 20°C)
Teplota tavení	660.4°C
Teplota varu	2494°C
Tepelná vodivost	247 W.m^{-1} (při 25°C)
Elektrická vodivost	$62\% \text{ IACS (Al 99.8)}$ $65 - 66\% \text{ IACS (Al 99.999+)}$
Latentní teplo tavení	397 kJ.kg^{-1}
Latentní teplo varu	10.78 MJ.kg^{-1}
Objemová změna při krystalizaci	6.5%
Měrná tepelná kapacita	0.900 kJ/kg.K (při 25°C) 1.18 kJ/kg.K (při 660.4°C)
Spalné teplo	31.05 MJ/kg
Elektrický odpor	26.2 n.m (Al 99.999+ při 20°C) 26.55 n.m (Al 99.8 při 20°C)
Teplota supravodivosti	1.2 K
Účinný průřez pro neutrony	0.2 b/atom pro energii neutronu 0.02 V 0.65 b/atom pro energii neutronu 100 MV
Atomová hmotnost	26.98154

Tabulka 2-2 Hodnoty teplotní roztažnosti hliníku [14]

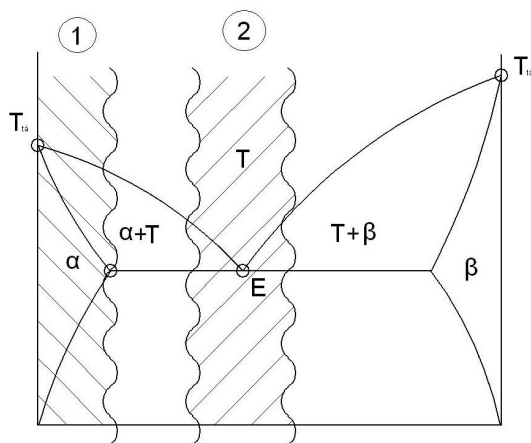
Teplotní interval [°C]	Průměrný koeficient teplotní roztažnosti . $10^{-6} [K^{-1}]$
- 200 až 20	18.0
- 150 až 20	19.9
- 50 až 20	21.8
20 až 100	23.6
20 až 200	24.5
20 až 300	25.5
20 až 400	26.4
20 až 500	27.4

Tyto fyzikální vlastnosti mají využití v některých oborech, pro slévářenskou praxi mají hlavní význam tepelně fyzikální vlastnosti (měrná tepelná kapacita, tepelná vodivost, teplotní roztažnost , atd.).

2.1.2 Rozdělení slitin hliníku

Jak je obecně známo, slitiny hliníku se dělí podle různých hledisek, např. způsobu zpracování, tj. na slitiny slévářenské a slitiny pro tváření. Z hlediska možnosti zlepšení pevnostních vlastností vlivem tepelného zpracování (vytvrzování) můžeme slitiny hliníku dělit na další dvě skupiny: slitiny tepelně zpracovatelné (vytvrditelné), slitiny tepelně nezpracovatelné (nevytvrditelné).

Slitiny hliníku, tj hliník a přísadové kovy, tvoří většinou tuhé roztoky, kde maximální rozpustnost v tuhém stavu je při eutektické teplotě. Rozpustnost s klesající teplotou klesá a s teplotou okolí je zanedbatelná. Na obr. 2.3 jsou v diagramu s částečnou rozpustností pro ilustraci uvedeny dvě výrazné oblasti , oblast 1 vymezuje slitiny určené pro tváření a oblast 2 (okolí eutektického bodu), slitiny pro slévání.



- 1 - slitiny určené k tváření
- 2 - slévářenské slitiny

Obr. 2.3 Rovnovážný diagram s částečnou rozpustností

s vymezením slitin pro tváření a slévání

Slévárenské slitiny – mohou být binární nebo ternární. Binární slitiny jsou nejčastěji typu: Al-Si, Al-Mn, Al-Cu, Al-Mg. Ternární slitiny jsou Al-Si-Cu, Al-Si-Mg, , Al-Cu-Mg). Nejrozšířenější jsou typu Al-Si, které jsou označovány pod obchodním názvem siluminy. Podle obsahu křemíku se dělí na podeutektické (4,5 až 10) % Si; eutektické (10 až 13) % Si a nadeutektické, tj více než 13% Si.

Slitiny určené ke tváření – též mohou být binární a ternární. Slitiny hliníku pro tváření se dělí především podle toho, zda je možné jejich vlastnosti měnit precipitačním vytvrzováním, dělíme je do dvou skupin (vytvrditelné a nevytvrditelné). Vytvrditelné jsou typu: Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si, Al-Zn-Mg, Al-Ti-Mg-Cu a nevytvrditelné typu (Al-Mg, Al-Mn).

V současné době značná pozornost je věnována slitinám na odlitky, protože tyto odlitky mají značné průmyslové využití. Označování slévárenských slitin hliníku je prováděno podle ČSN EN 1706. Touto normou, platnou pro slévárenské slitiny na výrobu odlitků, je stanoveno označování písmeny ve tvaru EN AC a pěti číslicemi (např. pro slitinu AlCu4MgTi, která je použita v této diplomové práci, je označení EN AC-21000). Jednotlivé části označení slitiny jdou v pořadí: EN – evropská norma, písmeno A určuje hliník, písmeno C určuje odlitky a pět číslic označuje chemické složení slitiny.

První číslo v pětimístném číselném označení slitin hliníku je udáváno číslo skupiny slitiny stejně jako u označení slitin pro tváření podle hlavních slitinových prvků. V tabulce 2.4 je uvedeno značení prvků ve slitinách hliníku.

Tabulka 2.4 Značení prvků ve slitinách hliníku [14]

Číselné označení slitiny	Prvek ve slitině
Řada 10000	Al minimálně 99% a více
Řada 20000	Slitina AlCu
Řada 30000	Slitina AlMn
Řada 40000	Slitina AlSi
Řada 50000	Slitina AlMg
Řada 60000	Slitina AlMgSi
Řada 70000	Slitina AlZn

Řada 80000**Slitina Al s různými prvky**

Slévárenské slitiny hliníku mají vůči slévárenským slitinám z jiných kovů řadu příznivých vlastností:

- a) dobrá slévatelnost, která se výrazně zlepšuje se zvyšujícím se podílem příslušného eutektika podle chemického složení.
- b) nízká teplota tavení;
- c) malý interval teplot při krystalizaci;
- d) obsah vodíku v odlitku, který je jediným rozpustným plynem v hliníku, lze minimalizovat vhodnými technologickými podmínkami;
- e) dobrá chemická stabilita (odolnost vůči korozi);
- f) dobré povrchové vlastnosti odlitku u většiny slitin je nízká náchylnost k tvorbě trhlin za tepla.

Společným znakem všech slévárenských slitin hliníku je celkově vyšší obsah legujících prvků než u slitin pro tváření. Ze strukturálního hlediska jde o heterogenní slitiny s přítomností eutektika. Volba vhodné slitiny pro vyhotovení odlitku požadovaného tvaru a rozměru je ovlivňována těmito pěti hlavními faktory:

Charakteristiky vybraných typů slitin hliníku

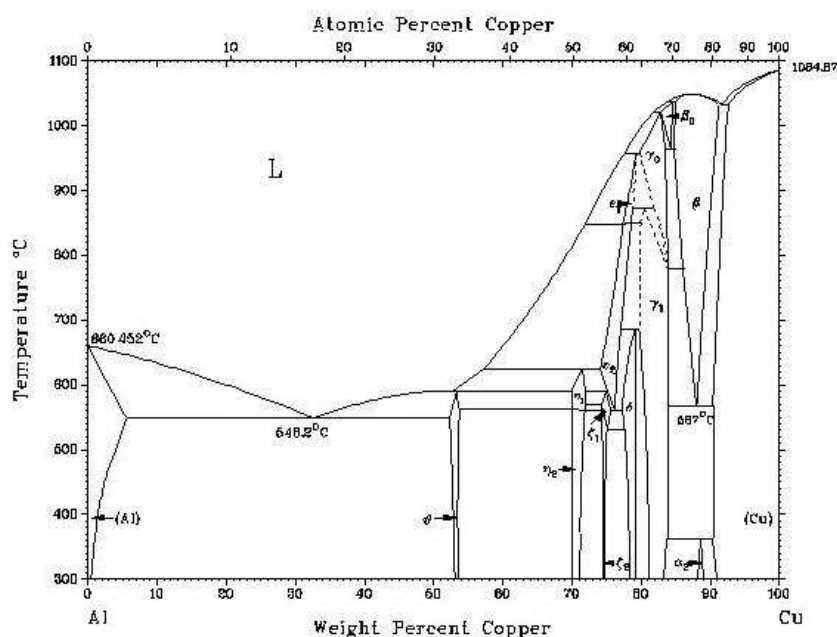
Z důvodu, že v této diplomové práci byly provedeny experimenty se slitinou AlCu4MgTi, je tato kapitola zaměřena na slitiny typu Al-Cu-Mg.

Slitiny typu Al-Cu-Mg - tyto slitiny představují nejvíce používané materiály této podskupiny. Jsou to zejména duraly AlCu4Mg AlCu4Mg1 a AlCu4Mg1Mn, dosahující značné pevnosti po vytvrzení tepelným zpracováním (R_m až 530 MPa).

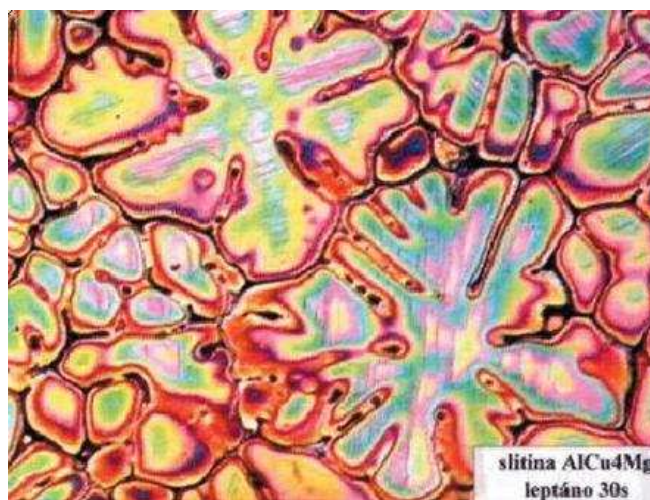
Na obr. 2.6 je uveden rovnovážný diagram Al-Cu, ze kterého je patrné, že maximální rozpustnost mědi v tuhém roztoku hliníku je za rovnovážných podmínek 2,48 at.% (~ 5,7 hm.%) Cu při teplotě eutektické reakce 548,2 °C.

Mechanické vlastnosti slitin Al – Cu závisí na tom, jestli se Cu nachází v tuhém roztoku ve formě sféroidické, případně jako rozptýlené částice, anebo zda vytváří síť na hranicích zrn.

Na obr. 2.7 je uvedena struktura slitiny AlCu4Mg po leptání pro barevnou metalografii.



Obr. 2.5 Rovnovážný diagram Al-Cu [14]



Obr. 2.7 Struktura slitiny AlCu4Mg Michna [14]

Ve slitině AlCu4Mg1 (typ AlCuMg) se vyskytuje především binární eutektikum α + CuAl2 a malé množství ternárního eutektika α + CuAl2 + Cu2Mg2Al5. Mimo těchto základních složek fází se zde mohou vyskytovat i další fáze: Mg2Si, FeAl3, AlFeMnSi, AlCuFeMn apod.

Slitiny typu Al – Cu - jsou dvojího druhu, obsah Cu 4 – 5 % nebo 9 – 11 %. Jejich význačnou vlastností je pevnost při vyšších teplotách a odolnost vůči oděru. Ještě lepších pevnostních vlastností při vyšších teplotách je možno dosáhnout přidáním Ni

a Mg. Naopak nevýhodou je nízká korozní odolnost a horší slévatelnost. Zvýšení pevnostních vlastností těchto slitin je možno ještě dosáhnout tepelným zpracováním. Jedná se např. o slitiny: ČSN EN 1706, slitina AC – AlCu4MgTi (4.2 – 5.0 % Cu, 0.15 – 0.35 % Mg, 0.15 – 0.35 % Ti).

Podle ČSN 42 4315, slitina AlCu4Ni2Mg2 (3.75 – 4.5 % Cu, 1.75 – 2.25 % Ni, 1.25 – 1.75 % Mg).

Slitiny typu Al – Cu – Si - hojně používané slitiny, kde se navíc vůči předchozímu typu legováním Si zlepšily slévárenské vlastnosti. Některé z nich obsahují více Cu, jiné mají převahu Si. Slitiny, které mají obsah Cu větší než 3 %, jsou tepelně zpracovatelné, ovšem většinou se tepelně upravují pouze slitiny, kdy je legován také Mg. Tam, kde je vyžadován nízký koeficient tepelné roztažnosti, jsou používány slitiny s obsahem Si nad 10 %. U slitin s vysokou odolností vůči otěru dosahuje obsah Si až 22 %.

V českých normách jsou to např. ČSN 42 4339 - slitina AlSi8Cu2Mn (7.5 – 9.5 % Si, 2 – 3 % Cu, 0.3 – 0.5 % Mn), ČSN EN 1706 - slitina AC-AlSi6Cu4 (5.0 – 7.0 % Si, 3.0 – 5.0 % Cu), ČSN 42 4386 - slitina AlSi20Cu2NiMgMn (19.0 – 22.0 % Si, 1.5 – 2.0 % Cu, 0.5 – 1.0 % Ni, 0.8 – 1.2 % Mg, 0.1 – 0.4 % Mn).

Slitiny typu Al – Si (siluminy) - obsah Si se u těchto slitin, jak bylo výše uvedeno se pohybuje mezi 4,5 až 13 %. Používají se při požadavcích na odolnost vůči korozi a dobrou slévatelnost. Nejpriznivější vlastnosti vykazují siluminy blížící se svým obsahem Si eutektickému složení (tj. 12 až 13 % Si).

Slitiny typu Al – Mg -

Jejich předností je velmi dobrá odolnost proti korozi a jejich stálost i ve slané vodě. Dobře se mechanicky obrábějí a jsou svařovatelné. Výhodou je také možnost provádět u odlitků eloxování povrchu. Naopak špatná slévatelnost a problémy při procesu tavení s velkou slučivostí hořčíku s kyslíkem jsou nevýhodou. V českých normách jsou to:

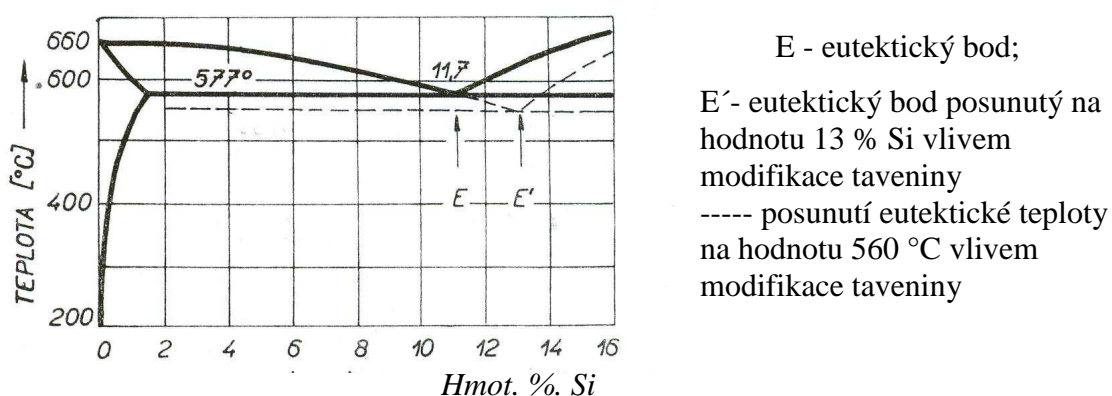
ČSN 42 4515 - slitina AlMg5Si1Mn (4.40 – 5.50 % Mg, 0.60 – 1.50 % Si, 0.25 – 0.6 % Mn)
ČSN 42 4519 - slitina AlMg10SiCa (7.00 – 10.00 % Mg, 0.01 – 2.00 % Si, 0.01 – 0.15 % Ca)

Slitiny typu Al – Zn – Mg - vykazují výborné pevnostní vlastnosti již v litém stavu a mají poměrně dobrou odolnost vůči korozi. Výhodou je také dosažení pevnostních vlastností po 20 až 30 dnech pomocí přirozeného stárnutí. Nevýhodou je obtížná slévatelnost a při vyšších teplotách možnost tvorby trhlin. Pod napětím se jim velmi snižuje odolnost vůči korozi. V našich normách je to: ČSN EN 1706, slitina EN AC AlZn5Mg (4.50– 6.00 % Zn, 0.40 – 0.70 % Mg).

2.2 Modifikace a očkování slitin hliníku

Jak je obecně známo, cílem modifikace a očkování je dosažení změny v mikrostruktuře a makrostruktuře slitiny, přičemž se nemění jejich chemické složení. Změna struktury se může projevit zjemněním licí struktury (změna makrostruktury), změna primárně vyloučených fází, popř. zjemnění křehkých nebo lehce tavitelných fází (zjemnění mikrostruktury).

Na obr. 2.8 je uvedena část rovnovážného diagramu Al-Si s vyznačením snížené eutektické teploty z hodnoty 577 na 760 °C vlivem provedené modifikace taveniny před odléváním. Nemodifikovaný silumin se vyznačuje jehlicovitou strukturou křemíku.



Obr. 2.8 Vliv modifikace na diagram Al-Si [14]

Pod pojmem modifikace slévarenských slitin hliníku rozumíme metalurgické zpracování taveniny za účelem ovlivnění morfologie (vzhledu) eutektického křemíku, který se tím vylučuje ve formě velmi jemných částic (a ne v nepříznivých jehlicích). Očkování je též metalurgické zpracování taveniny za účelem zjemnění makrostruktury (zrn) odlitku, tj. zrn, které vznikají přímo z taveniny. Např. u siluminů to je zjemnění zrn α (u podeutektických slitin) a zjemnění krystalů β (u nadeutektických slitin).

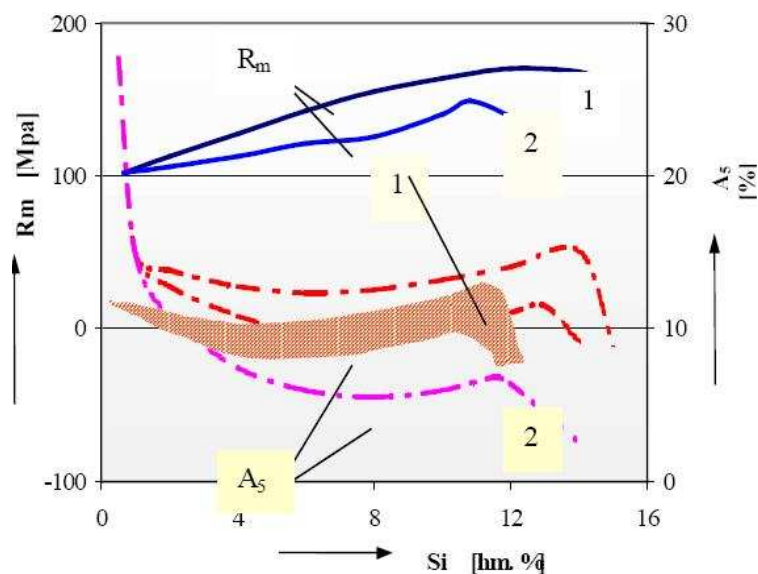
Modifikace se provádí s použitím modifikátorů, které se před odléváním dávají do taveniny. Modifikátory jsou to povrchově aktivní látky ke krystalizační složce slitiny. Přispívají k poklesu teploty taveniny, tj. zvyšují stupeň přechlazení taveniny, což umožňuje vznik menších krystalizačních zárodků. Povrchově aktivní látky (prvky) jsou Na, Sr, Ba pro podeutektické a eutektické siluminy, které mění stavební jednotku - modifikují eutektický křemík. Stroncium má i ten význam, že hliník nemodifikovaný stronciem při prvním tavení nese vlastnosti modifikace i v případě, že by byl použit při druhém tavení (např. jako vratný materiál). Tuto vlastnost např. sodík při modifikaci nevykazuje.

Modifikace siluminu se provádí tak, že se do taveniny ohřáté na příslušnou modifikační teplotu přidá stanovené množství sodíku nebo solí, které uvolňují sodík (např. směs $\text{NaCl} + \text{KCl} + \text{NaF}$), popř. se dává sodík kombinovaný se solemi. Zvláštní pozornost zaslouží výsledky modifikace antimonem, kterého stačí přidat 0,2 % a jehož modifikační účinek s dobou neklesá, proti modifikaci sodíkem, kde jeho účinek se s časem mění. Antimon se používá při odlévání siluminů do kokil, tj. při rychlém tuhnutí, ale i tak je jeho modifikace účinná jen u podeutektických slitin.

Do nadeutektických slitin se přidávají jiné přísady -

Očkování je proces, při kterém do taveniny před odléváním dáváme látky (např. fosfor, titan, bór), které ovlivňují primární krystalizaci odlitků. Příkladem očkovadla může být fosfor, který např. u siluminů zjemňuje primárně vyloučenou β - fází nadeutektických siluminů; popř. titan, který zjemňuje primárně vyloučenou α - fází podeutektických siluminů.

Na obr. 2.9 je uveden vliv modifikace na mechanické vlastnosti hliníkových slitin.



1 – modifikované slitiny, 2 – nemodifikované slitiny

Obr. 2.9 Vliv modifikace na mechanické vlastnosti hliníkových slitin [14]

Na obr. 2.10 a 2.11 jsou uvedeny struktury vybraných typů modifikovaných siluminů.



Obr. 2.10 Modifikovaný silumin – modře zbarvené globulitické (zrnité) částice křemíku, s patrnou mezidendritickou porezitou (slitina AlSi7Mg0.3). Zv. 300x [14]



Obr 2.11 Modifikovaný podeutektický silumin AlSi7Mg0.3 [14]

2.3 Faktory hodnotící použitelnost slévárenských slitin hliníku a odlitků z nich vyrobených

Slévárenské vlastnosti slitin hliníku - slévateľnost, odolnost vůči vzniku trhlin za tepla, malý interval krystalizace, dobré vlastnosti pro tlakové lití. Je nutno uvést, že slévateľnost je především ovlivněna teplotním intervalem krystalizace, viskozitou a povrchovým napětím taveniny. Odolnost vůči vzniku trhlin za tepla je všeobecně tím nižší, čím má slitina větší interval krystalizace a nižší pevnostní vlastnosti za vyšších teplot.

Požadované mechanické vlastnosti - pevnostní a plastické vlastnosti, tvrdost, možnost zvýšení pevnostních vlastností tepelným zpracováním.

Chemické vlastnosti - odolnost vůči korozi, možnost povrchové úpravy – eloxování. U hliníkových slitin je odolnost vůči korozi výrazně zhoršována přítomností Cu.

Vlastnosti hotových výrobků, resp. odlitků – nepropustnost kapalin v odlitku působením tlaku, rozměrová a teplotní stabilita.

Ekonomické faktory - náklady na mechanické obrábění, tavení a lití, tepelné zpracování, svařitelnost.

2.4 Tepelné zpracování slitin hliníku

Účelem tepelného zpracování je získání vyšších mechanických vlastností výrobků získaných ze slitin hliníku. Ve stavu po tváření u slitin hliníku převažuje ve struktuře primární tuhý roztok hliníku, zatímco u slévárenských slitin po odlití převažuje eutektikum. Tyto struktury vykazují po příslušném technologickém zpracování určité mechanické vlastnosti, které souvisí se získanou strukturou během jejich zpracování. Při výrobě odlitků tyto vlastnosti jsou ovlivňovány způsobem lití, charakterem slévárenské formy, metalurgickou přípravou taveniny, atd. Chceme-li zvýšit takto získané mechanické vlastnosti slitin hliníku, je možno provést tepelné zpracování – precipitační vytvrzování (k tomu účelu jsou vhodné jen určité typy slévárenských slitin hliníku).

Precipitační vytvrzování - Princip precipitačního vytvrzování v roce 1938 pomocí Laueovy metody na monokrystalech slitiny Al – Cu objevili Guinier a Preston. Při svém pokusu zjistili, že difrakční diagram pořízený na monokrystalech slitiny Al – Cu obsahuje pruhy, které vycházejí z reflexe mřížky hliníku a probíhají ve směrech $\langle 100 \rangle_{\text{Al}}$. Toto zjištění vysvětlili vznikem destičkovitých oblastí bohatých na měď, které leží na rovinách na $\{100\}_{\text{Al}}$ – podle objevitelů byly nazvány zónami Guiniera – Prestna (zóny GP). Finálním výsledkem přeskupení je změna mezirovinných vzdáleností a intenzity rozptýleného záření na velmi malých skupinách rovin $\{100\}_{\text{Al}}$. Po vynálezu elektronové mikroskopie se stalo jedním z prvních předmětů výzkumu právě vytvrzování hliníkových slitin. Ve všech soustavách schopných precipitačního vytvrzování má počáteční precipitát jinou strukturu než rovnovážná fáze. Toto bylo zjištěno jak elektronovou mikroskopií, tak metodou difrakce rentgenových paprsků. Při stárnutí probíhají reakce v pořadí: zóny – přechodný precipitát – rovnovážný precipitát. Důvodem je nekoherence rovnovážného precipitátu s matečným krystalem oproti přechodným strukturám, které jsou částečně koherentní nebo úplně koherentní, jak je tomu u zón.

V podstatě, z technologického hlediska zjednodušeně, precipitačním vytvrzováním rozumíme dva na sebe navazující úkony – rozpouštěcí žíhání a precipitační vytvrzování, které je označováno také jako stárnutí a výsledkem je změna mechanické a fyzikálních vlastností slitiny. Slitiny použité k precipitačnímu vytvrzování musí mít z hlediska rovnovážného diagramu podstatnou změnu rozpustnosti legujícího prvku (prvků) na teplotě.

Tepelné zpracování slitin hliníku precipitačním vytvrzováním se skládá z rozpouštěcího žíhání, rychlého ochlazení a z precipitačního vytvrzování.

Rozpouštěcí (homogenizační) žíhání – je ohřev a dostatečnou výdrž na takové teplotě, při které dojde k maximálnímu převedení přísady do tuhého roztoku hliníku. Při volbě teploty rozpouštěcího žíhání se vychází z fázového diagramu slitiny a z přesnosti regulace teploty v peci. Při homogenizačním ohřevu nesmí dojít k překročení teploty solidu, aby nedošlo k natavení hranic zrn slitiny. V takovém případě dochází k degradaci mechanických vlastností materiálu. Nejčastěji se používá žíhání rekrytalizační.

Rychlé ochlazení - zahřátá součást z hliníkové slitiny se při teplotě rozpouštěcího žhání se ochlazuje ponořením do vody. Tím vzniká přesycený tuhý roztok při teplotě okolí, u kterého je obsah rozpuštěné příměsi vyšší než odpovídá její rovnovážné rozpustnosti při dané teplotě. Při ochlazování se musí veškerá manipulace se slitinou provádět co nejrychleji, aby nedocházelo k částečnému rozpadu tuhého roztoku hliníku. U masivnějších součástí, kde hrozí nebezpečí deformací se používají jiná, méně razantnější ochlazovací média.

Stárnutí – je proces, při kterém dochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku, protože přesycený tuhý roztok je termodynamicky nestabilní. U některých slitin dochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku již při teplotě okolí - pochod označujeme jako *přirozené stárnutí*. Chceme-li rozpad přesyceného tuhého roztoku urychlit, pak tento proces označujeme jako umělé stárnutí. Při *umělém stárnutí* se proces urychlí ohřevem na určitou teplotu cca 160 °C. Při delší výdrži na teplotě stárnutí dochází k nežádoucímu hrubnutí vznikajícího precipitátu, čímž klesá tvrdost. Toto stádium označujeme jako přestárnutí. Někdy je nutno provádět umělé stárnutí slitiny v několika fázích, což je označováno *stupňovité stárnutí*.

2.5. Vliv tlaku na krystalizaci hliníku a jeho slitin

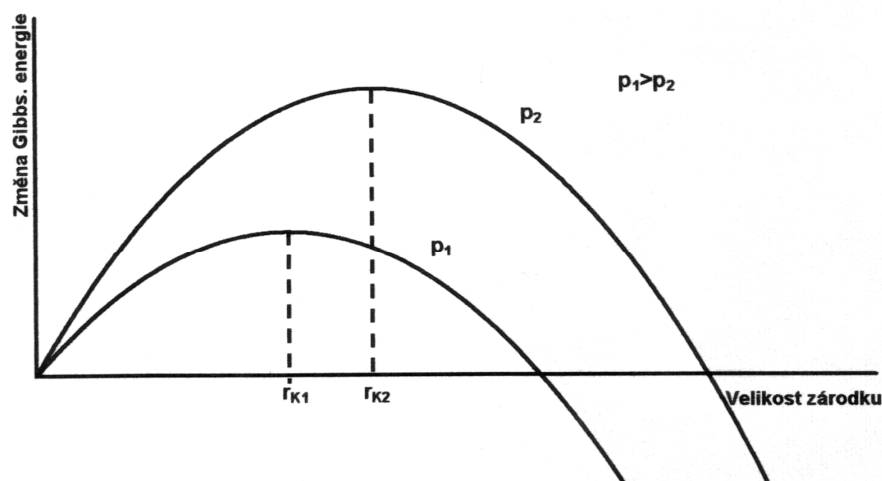
Krystalizace materiálu, v tomto případě slitin hliníku, je ovlivňována tepelnými, popř. i tlakovými poměry. Zvýšený tlak ovlivňuje velikost krystalizačních zárodků, viz obr. 2.12. Čím je vyšší tlak, tím krystalizační zárodky jsou menší a celkově je i jemnější krystalická struktura materiálu. Ve slévárenské praxi doposud vliv tlaku na krystalickou strukturu se projevuje především při vysokotlakém lití odlitků. Díky tomu, že slévárenská forma prodělává tzv. disperzní plnění taveninou (v tavenině jsou rozptýleny částice vzduchu) vysokotlaké odlitky z tohoto důvodu vykazují určitou poróznost. Poróznost odlitku souvisí i s technologickými parametry, se kterými souvisí i celková kvalita odlitků. Ta je ovlivňována plněním dutiny formy (rychlost přeplnění, plnění rychlost, bod přepnutí mezi nimi a tlak působící na tuhnoucí odlitek ve formě, tzv. dotlak). Vysoká hodnota dotlaku na jedné straně snižuje životnost formy a prodlužuje dobu lícího cyklu, ale na straně druhé zvyšuje dolití odlitku, zmenšuje objem vzduchu ve ztuhlém odlitku (porezita) a tím zvyšuje jejich kvalitu (pevnost, těsnost).

Dlouhodobým zkoumáním bylo zjištěno, že správná rychlost plnění dutiny lakové lící formy v místě zaústění vtokového kanálu do odlitku je mezi 30 až 60 m.s⁻¹.

Velikost dotlaku se určuje podle toho, k čemu se odlitý díl bude následně používat, kde jsou kladeny vysoké požadavky na těsnost a pevnost (automobilový průmysl) se použije dotlak v rozmezí mezi 60 – 100 MPa.

Dodržování nastavených hodnot rychlosti licího pístu a dotlaku je zásadní pro výrobu kvalitních odlitků.

Při krystalizaci pod tlakem má na kritickou velikost krystalizačního zárodku vliv jak podchlazení taveniny řízené vysokou schopností akumulace formy z kovu tak atermické podchlazení, tím rozumíme podchlazení vlivem zvýšeného tlaku působícího na taveninu ve fázi krystalizace. Vysoký tlak příznivě působí při vzniku krystalizačního zárodku s kritickou velikostí na vznik jemnozrnné struktury. Působí-li tlak na taveninu při fázi krystalizace, je kritická velikost krystalizačních zárodků menší.



Obr. 2.12 Velikost krystalizačního zárodku v závislosti na změně Gibbsovy energie [9]

Stanovením kritické velikosti zárodků se zabýval BORISOV, který stanovil vztah pro výpočet kritické velikosti krystalizačních zárodků.

$$r_{kr} = \frac{2 \cdot \delta \cdot M^* (T_L^0 + \Delta T_L^P)}{L_{kr} \cdot \rho_1 \cdot (\Delta T^0 + \Delta T_S^P)}, \quad (2-1)$$

kde značí: M^* - molovou hmotnost taveniny [$\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$];

L_{kr} - latentní krystalizační teplo [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$];

ρ - hustotu taveniny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];

δ - povrchové napětí na hranici tavenina – krystalický zárodek

$[\text{N} \cdot \text{m}^{-1}]$;

T_L^0 - teplotu likvidu bez působení tlaku $[\text{°C}, \text{K}]$;

ΔT_L^P - zvýšení teploty likvidu při působení tlaku

ΔT^0 - podchlazení bez působení tlaku $[\text{°C}, \text{K}]$;

ΔT_S^P - zvýšení teploty solidu při působení tlaku.

Závislostí tlaku na počet krystalizačních zárodků se zabíral Batišev, který zjistil, že počet kr. zárodků se stoupajícím tlakem roste. Další výzkum pak dokázal, že největší vliv tlaku se ukazuje při přeměně taveniny v tuhou fázi, kdy při tomto procesu tavenina změní svůj objem. Tento jev lze popsat jako další vztah podle Borisova. Jde o závislost tlaku a objemu vycházející z tzv. teorie děrové. Změna objemu je pak funkcí eliminace děr.

$$V - V_p = N \cdot V_D \cdot \exp\left(-\frac{\Delta G_D}{RT}\right) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{p \cdot V_D}{k \cdot T}\right)\right], \quad (2-2)$$

kde značí: V - počáteční objem taveniny i děr $[\text{m}^3]$;

V_p - objem kovu při působení tlaku $[\text{m}^3]$;

V_d - objem díry $[\text{m}^3]$;

N - počet atomů kovu;

G_d - Gibbsovu energii pro vznik 1. díry $[\text{J} \cdot \text{m}^{-3}]$.

Ze vztahu (2-2) jee patrné, že, tlak a celkový objem jsou na sobě závislé. Objem můžeme tlakem zmenšit při konstantní teplotě do míry, kdy přejde tavenina na krystalickou fázi. Vliv tlaku v závislosti na teplotě krystalizace slitiny a tím i na teplotě likvidu a solidu lze vyjádřit Clausius-Clapeyronovou rovnicí:

$$\frac{dT}{dp} = \frac{T(V_L - V_S)}{\Delta H_{L,S}^0}, \quad (2-3)$$

kde značí: $\Delta H_{L,S}^0$ - změnu entalpie při krystalizaci $[\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}]$

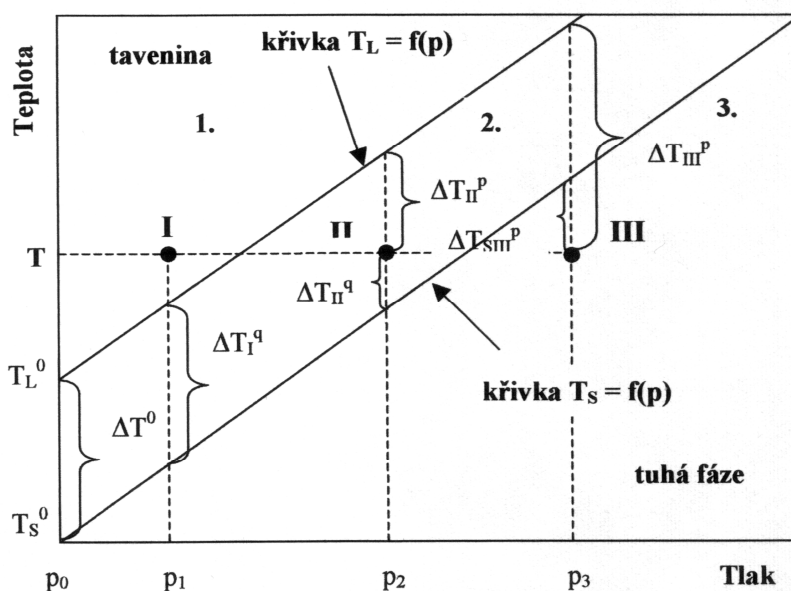
$V_L - V_S$ - rozdíl molových objemů (kapalina a tuhá fáze) $[\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}]$;

T - teplot $[\text{K}]$;

dT/dp - změnu teploty závislou na tlaku.

Ze vztahu (2-3) je zřejmé, že teplota krystalizace souvisí s tlakem a měrným objemem. U kovů většinou teplota krystalizace roste s rostoucím tlakem. Pokud tavenina za působení tlaku krystalizuje, potom je důležité i tzv. atermické podchlazení.

Na obrázku č.4 je diagram vlivu tlaku v závislosti na krystalizující slitině s teplotami solidu a likvidu. Při působení tlaku na taveninu se rovnovážné teploty mění. Z diagramu je možné odečíst hodnotu termického podchlazení vlivem teploty a tlaku.



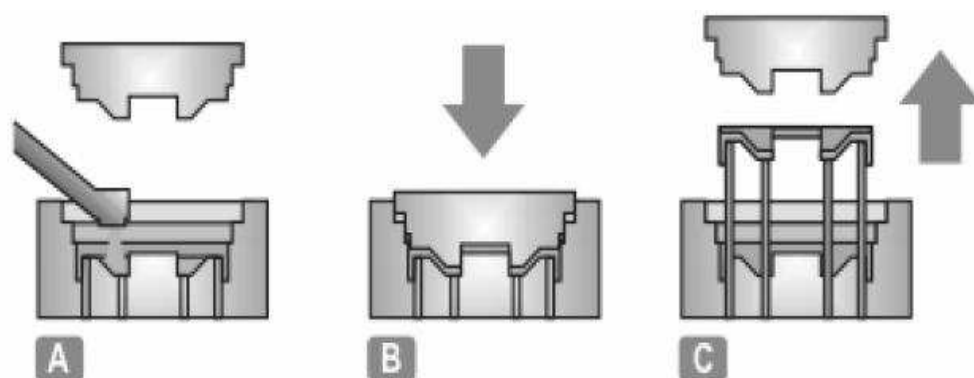
Obr. 2.13 Vliv tlaku a teploty na vznik atermického podchlazení [9]

Na obr. 2.13 jsou pozorovatelné 3 oblasti, první je stabilní tekutý stav, druhý metastabilní tekutý stav, třetí metastabilní tuhý stav. Podmínkou pro uskutečnění krystalizace taveniny je dostat hodnotu tlaku takovou, aby zaručila nárůst teploty podle analýzy Borisova. To znamená, že teplota likvidu za působení tlaku musí být větší nebo rovna teplotě likvidu při působení normálního tlaku a teplotě.

2.6. Metoda lití s krystalizací pod tlakem -metoda Squeeze casting

Ve 30. letech minulého století byla vyvinuta metoda lití s krystalizací pod tlakem (LKT) squeeze casting. Zde se využívá pomalé plnění formy bez turbulence, strhávání a uzavírání plynů v dutině formy. Metoda se postupně rozšířila do USA, Japonska, Německa posléze do celého světa. Tlak působící na taveninu vzniklý lisem, (resp. tvarovým razníkem) činí 80 až 110 MPa příznivě působí na utváření krystalické struktury odlitku (zaoblená zrna) rozlišujeme metodu přímou (direct squeeze casting), metodu nepřímou (indirect squeeze casting) plnění formy taveninou je při rychlosti 0.5 m.s^{-1} . Jak přímá, tak nepřímá metoda lití s krystalizací pod tlakem potlačuje vznik staženin nebo je zmenšují na minimální velikosti, proto se využívají při výrobě odlitků s tepelnými uzly nebo odlišnou délkou stěn. Jen pro zajímavost touto metodou byl vyroben pozoruhodný tlakový odlitek bloku spalovacího motoru Porsche Boxter ze slitiny AlSi9Cu3 s zalitými vložkami z kompozitního materiálu.

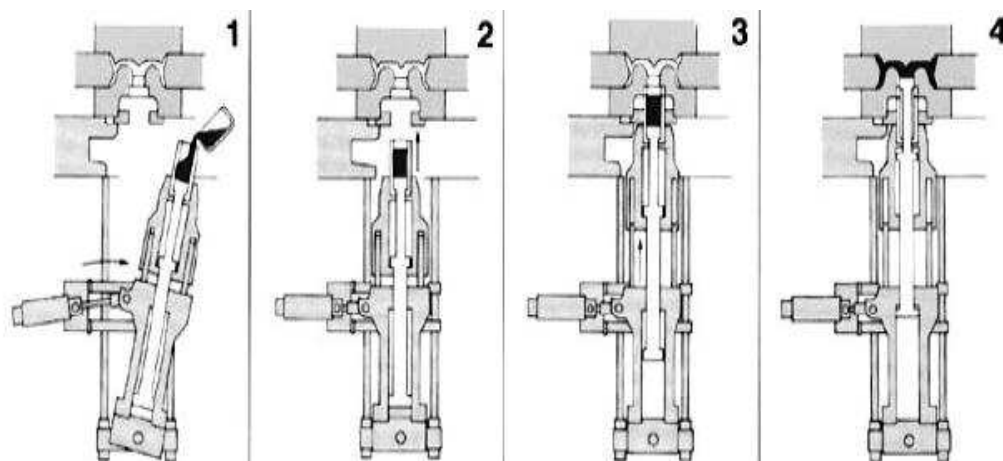
Přímá metoda lití s krystalizací pod tlakem – tato metoda funguje na principu přímého vtačování taveniny do dutiny formy. Na tuto technologii potřebujeme tvářecí lis, na kterém je přidělena dělená forma z oceli. Metodu také můžeme označit jako přímá metoda lití pod tlakem. Na obr. 2.



- A, nalití taveniny do spodní části formy
B, přitlačení horní části formy – získání odlitku
C, otevření formy – vyhození odlitku pomocí vyhazovače

Obr. 2.14 Schéma principu přímé metody lití s krystalizací pod tlakem [14]

Nepřímá metoda lití s krystalizací pod tlakem - tato metoda je založena na principu vtláčování speciálního pístu do pomocného nálitku, který je umístěn nad materiálovým uzlem odlitku ještě ve chvíli, než ztuhne kov ve formě. Tato metoda je využita jako pomocná při vysokotlakém lití hliníku při lití bloků spalovacích motorů ve firmě škoda auto.



- 1, odlévání taveniny
- 2, pohyb pístu (razníku) se klopným válcem
- 3, příslušenství sklopného válce k formě
- 4, vstříknutí taveniny pístem do dutiny formy

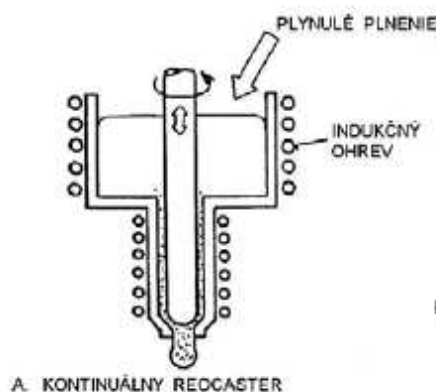
Obr 2. 14 Schéma principu nepřímé metody lití s krystalizací pod tlakem [14]

Metody polotuhého stavu - Semi solid metalworking (SSM) - je proces, který pracuje se speciálně upravenou konzistencí materiálu. V našem případě jde o jemné granule které se do tlakové formy převádí do polotekutého stavu. Jde o stav někde kolem teploty likvidu a teploty solidu s konzistencí podobnou horké plastelíně, viz obr. 2.15. Výhoda této technologie je v získání odlitků bez staženin.



Obr. 2.15 Polotovar slitiny hliníku v polotuhém stavu určené pro metodu SSM [14]

Rheocasting – SSM se speciálně připraveným polotovarem - v rheocasteru, dělení polotovaru, ohřev válečků, vkládání válečků do komory tlakového stroje – rychlost plnění dutiny formy 2 m.s^{-1} . Speciální příprava polotovarů je v rheocasteru, viz obr. 2.16.



Obr. 2. 16 Příprava polotovaru v rheocasteru [14]

Thixocasting a thixoforming – lití a formování jde opět o metodu založenou na tixotropním stavu materiálu (nestékavý na svislých plochách). Polotovar je vyroben kontinuálním litím s určitou strukturou. Materiál pro tuto metodu je označován Thixalloy (AlSi10MgCu). Tato slitina je při vlastní výrobě polotovarů plynulým odléváním ještě podrobena míchání v elektromagnetickém poli. Polotovary z těchto slitin jsou dále nařezány na válečky například. Při samotném odlévání se pak polotovar ohřeje indukčním způsobem na teplotu zhruba 578°C , což je polotekutý stav při kterém má polotovar asi 55% tuhé fáze. Za tohoto stavu se potom pomocí robotu nebo

manipulátoru vloží do komory tlakového stroje a v polotekutém stavu a dále se vtlačují do dutiny formy. Díky této metodě získáme neporézní a kompaktní odlitky s nepatrnými otřepy. Struktura tohoto materiálu získaného v tlakové formě má globulární tvar krystalů. Díky tomu má také velice dobré mechanické vlastnosti ve srovnání s klasickým odléváním. Thixoforming je metoda, která pracuje s válcovým polotovarem připraveným stejným způsobem jako u thixocastingu. Polotovar obsahuje 70 % tuhé fáze a vkládá se do půlené slévárenské formy upevněné na tvářecím lise.

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

Cílem mé diplomové práce bylo experimentální sledování vlivu tlaku na krystalizaci čistého hliníku a jeho slitin (AlCu4MgTi a AlSi12), přičemž byla sledována krystalizace a mechanické vlastností materiálů. Zkoumání struktury probíhalo pod světelným mikroskopem a hodnocení v softwaru NIS ELEMENTS. Byla hodnocena tvrdost vzorků. S tímto plánem se také shoduje garantový projekt GAČR 101/09/1996, který je řešen na Katedře strojírenské technologie, FS – TU v Liberci.

Hlavní myšlenkou uplatnění této technologie je získání tvarových konstrukčních dílů s požadovanou kompaktní strukturou v celém objemu výrobku. Výroba konstrukčních dílů, resp. odlitků vysokotlakým způsobem, která je založena na podobném způsobu nepřináší kompaktnost materiálu, obzvláště silnější partie dílu obsahují drobné mikrodutinky (mikroporozita), které vylučují použití těchto dílů při jejich tepelném namáhání. Bohužel, někdy ani vakuování dutiny formy nebo její lokální stlačení nepřináší očekávané výsledky. Z této dnes používané metody je zřejmé, že velké rychlosti pohybu pístu tlakového stroje jsou příčinou disperzního plnění dutiny formy a vzniku mikroporozity odlitků. V této souvislosti je nutné hledat nové možnosti výroby konstrukčních dílů, od kterých se vyžaduje právě vysoká hutnost materiálu bez vnitřních vad.

Tento způsob navrhované technologie je založen na zpracování taveniny s využitím lisovacího tlaku. V této souvislosti je důležitá rychlost taveniny, která se má dostat do dutiny nástroje. V tomto smyslu musí být právě vtoková soustava volena tak, aby byly vytvořeny podmínky pro gravitační lití. Protože jediné taková vtoková soustava nebude způsobovat disperzní plnění (tj. rozptýlený vzduch v tavenině) nástroje taveninou. Současně je důležité, aby tavenina vyplnila co nejrychleji dutinu nástroje. Tím také nebude čas na naplynění taveniny. Pokud toto řešení vychází z předpokladu, že tavenina musí vyplnit dutinu nástroje v co nejrychleji, pak je důležité, aby síla razníku působila na taveninu ihned jak vyplní taveniny dutinu nástroje. Tím se zamezí jejímu víření a vzniku vnitřních vad tvářeného dílu. Díky vysokému tlaku, který je nutno na taveninu vyvodit (cca 150 MPa i tlak vyšší), dochází především k atermickému podchlazení taveniny, které vede k velmi příznivým podmínkám vzniku jemných krystalizačních zárodků vznikající tuhé fáze, které právě díky přímému vlivu

tvárového lisovacího razníku jejich další růst je omezen, čímž vzniká velmi jemná krystalická struktura materiálu v podobě drobných krystalů zaoblených tvarů a současně je zabezpečeno vytváření velmi hutné struktury materiálu (bez vnitřních vad a mikroporozity) vyrobeného konstrukčního dílu. Díky těmto velmi příznivým tlakovým poměrům nevzniknou podmínky pro růst rozvětvených krystalů dendritického typu, tak jak je např. typické pro tlustší partie odlitků vyráběných vysokotlakým litím. Současně výhodou této technologie je výroba velmi členitých konstrukčních dílů s velkou využitelností taveniny, proces trvá velmi krátkou dobu.

Hlavní význam uplatnění této metody je v tom, že tvarování součástí se provádí díky využití kapalného stavu materiálu na jednu pracovní operaci, a to stlačením taveniny v dutině tvarového nástroje vnikajícím tvarovým razníkem do tvarové raznice (resp. kovové slévárenské formě netradiční konstrukce), bez nutnosti využití dlouhých vedlejších časů.

Všechny slitiny, včetně čistého hliníku, byly odlity stejným způsobem do formy pod tlakem vyvolaným od tvářecího hydraulického lisu. Protože se jedná o netradiční metodu, jde o progresivní metodu zpracování hliníku, bylo nejdříve nutné vytvořit metodiku. Navržená metodika se skládala z několika částí. Nejdříve byla připravena a metalurgicky ošetřena tavenina. Po změření teploty taveniny termočláňkovým čidlem s digitálním výstupem - GTH 1100 (digital thermometer) – výrobce Německo, byla vlita do dutiny formy a ihned na ní začal působit razník po dobu 15[s]. Nástroj byl ohřátý na teplotu 200 [°C]. Po ztuhnutí „odlitku“ tvaru rotačního komolého kužele byl odlitek z nástroje vyhozen vyhazovačem

3.1 Použité zařízení

Pro sledování krystalizace pod tlakem byl vyroben speciální nástroj (tvořený razníkem a raznicí) v aplikaci s hydraulickým lisem typu CBA 300/63. Označení 300/63 znamená sílu vyvozenou vrchní/spodní částí lisu. Nástroj, který byl upevněn na hydraulický lis je v podstatě tvárník a tvárnice. Tvárnice svým způsobem tvoří funkci ocelové vysokotlaké formy. Pro ilustraci zde uvádím obrázek tohoto lisu, který se nachází na katedře strojírenské technologie Technické Univerzity v Liberci v metalurgické dílně.

Pracovním stroj - pro aplikaci této technologie výroby konstrukčních dílů je tvářecí lis vyvozování, který vyvozuje sílu na tvarový razník. V úvahu může přicházet klikový lis (energie na materiál se vyvozuje pohybem beranu pomocí klikového mechanismu, jeho charakteristické pracovní rysy jsou: pracuje tlakem a jeho zdvih je stále stejný, pracovní rychlost je $0,5$ až $0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Dále vřetenový lis, který pracuje s těmito parametry dosedací rychlost je $0,5$ až $0,9 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}]$, pracovní kapacita lisu je jeden, max. 2 údery, má možnost regulovat energii úderu změnou otáček setrvačníku, lis má vyhazovač uložený zpravidla ve spodní části nástroje. Dále v úvahu může přicházet hydraulický lis, který využívá potenciální energie, která je dána tlakovým médiem (olej) v hlavním válci. Jmenovité pracovní síly F_j lze dosáhnout v kterékoliv poloze beranu, která je k dispozici po celou dobu jeho zdvihu. Rychlost beranu je oproti bucharům, či klikovým lisům značně menší. Pro zpracování neželezných kovů se používá rychlost tváření $0,01$ až $0,02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Jak je obecně známo, hydraulické lisy se využívají pro tváření kovů různými technologiemi.

Pro účely řešení tohoto lze použít hydraulický lis CBA 300/63 který je opatřen novou řídicí jednotkou a lze vyvodit síly až 1500 [kN] .



Obr. 3.1 Hydraulický lis CBA 300/63 použitý při experimentu

3.1.1 Charakteristika pracovního nástroje

Pracovní tvarový nástroj, se skládá v podstatě z raznice s tvarovou dutinou a tvarového razníku. Nástroj je vyroben třískovým obráběním jako celý tvarový díl z oceli ČSN 19552 (chrom - molybden - křemík - vanadová ocel, která se používá ke kalení v oleji a na vzduchu, vykazuje velmi dobrou prokalitelnost a tím také dosahuje vysokou pevnost za tepla a odolností proti popuštění, dále vykazuje velmi dobrou houževnatost a plastické vlastnosti při normálních i zvýšených teplotách. Dále ocel vykazuje velmi dobrou odolnost proti vzniku trhlinek tepelné únavy a malou citlivost na prudké změny teploty a je vhodná pro výrobu nástrojů, které je nutno při práci chladit vodou.. Ocel tepelném zpracování získává vysokou pevnost až 1800 [MPa] Tato ocel je vhodná pro výrobu nástrojů pro tváření za tepla (tj. velmi namáhané malé a středně velké zápustky a vložky zápustek, tlakové formy, atd.). Při konstrukci do sebe zapadajících dílů bylo dbáno na to, aby byly vytvořeny potřebné vůle s ohledem na přehřev nástroje na teplotu cca 200 až 250 °C. Další důležitým prvkem nástroje je vyhazovač, který podle tvaru konstrukce dutiny nástroje musí zabezpečovat plynulé a rovnoměrné vysunutí vyrobeného dílu z nástroje. Současně důležitá je konstrukce a zaústění vtoku do dutiny nástroje. Musí zabezpečovat plynulé vtečení taveniny do dutiny nástroje v krátkém časovém okamžiku. Současně dutina nástroje musí být řešena i s ohledem na její vyhřívání. Nevyhříváný prostor způsobuje velké teplotní spády mezi taveninou a formou, což vede k povrchovým vadám výrobku rýhám a nebo zavaleninám. Dutina nástroje a těleso tvarového razníku musí být před prací ošetřena ochranným lubrikačním nástřikem, např. prostředek je na bázi grafitu, který odolává vysokým teplotám, lze použít nástřik pod označením Molybkombin UMF T4, který vytváří film suchého maziva do teploty 450 °C a pro současnou dobu je ekologicky schůdný neobsahuje zapáchající činidla.

Dutina v raznici má kuželovitý tvar o Ø 100mm v horní části, Ø 90mm v dolní části a výšku pracovní části 120mm. Razník má rozměry Ø100mm a výšku 100mm. Speciální zařízení je opatřeno vtokovým kanálem pro eliminaci víření taveniny a klidný průběh celého procesu lití taveniny do dutiny raznice. Objem vlité taveniny činil asi 0,77 [dm³] a líc formy byl opatřen nástřikem. Tímto způsobem byly zhotoveny všechny zkoušené odlitky. Součástí návrhu metodiky byla i eliminace staženin. Na obr. 3.2 je vidět speciálně vyrobené zařízení pro sledování krystalizace slitiny.



Obr. 3.2 Speciálně vyrobené zařízení pro sledování krystalizace použitých slitin a čistého hliníku pod tlakem

3.2 Charakteristika použitých slévarenských slitin

Použité slitiny – lze předpokládat, že pro účel řešení projektu budou použity slitiny na bázi hliníku: EN AC- AlCu4MgTi; EN AC - AlSi12; AN AC - AlSi9Cu3; EN - AC - AlSi10Mg, EN AW 6056. EN AW 6066. Taveniny slitin hliníku budou získány tavením z hutnických housek. Pro tavení jsou výhodné plynové pece nebo pece odporové. Tavenina před nalitím do nástroje bude metalurgicky ošetřena- rafinační solí, při průmyslovém uplatnění lze doporučit profouknutí taveniny před odléváním dusíkem a také stažení strusky z povrchu taveniny. K odlévání při průmyslové aplikaci doporučit běžné lící pánve, pro výrobu menších konstrukčních dílů lze doporučit grafitové kelímky. Bohužel, pro průmyslovou aplikaci tohoto procesu výroby konstrukčních dílů je potřeba vybavení dalším provozně nutným náčiním a pomůckami, např. pro měření teploty taveniny, ochranné pomůcky, atd.

Pro experimenty byly použity slitiny AlCu4MgTi a AlSi12.

Slitina AlCu4MgTi – dobré pevnostní vlastnosti za vyšších teplot a dobrá odolnost vůči otěru. Velmi dobré pevnostní vlastnosti jsou docíleny přidáním Mg. Pro zjemnění zrna je přidán Ti. Nevýhodou je špatná slévatelnost a nízká korozní odolnost. Pevnost je možno zvýšit tepelným zpracováním.

Slitina AlSi12 – je to eutektickou slitinu s výbornými slévárenskými i technologickými vlastnostmi, dobrou odolností proti korozi, dobrou obrobitelností a střední pevností. Slitina je vhodná na všechny technologie odlévání, nejčastěji se však lije do pískových forem nebo do kovových gravitačně nebo pod nízkým tlakem. Má silný sklon ke staženinám v silnějších stěnách. Při lití do pískové formy je nutné modifikovat sodíkem, při lití do kovové formy se obvykle modifikuje sodíkem nebo storiem, hlavně u odlitků se značně rozdílnou tloušťkou stěn. Používá se pro tenkostěnné odlitky s vysokou houževnatostí pro odlitky odolné před korozi, lopatky žebrovaná tělesa, skříňovité odlitky atd..

Chemická složení zkoumaných slitin jsou uvedena v tabulkách 3-1 a 3-2. Fyzikální vlastnosti sledovaných slitin jsou uvedeny v tabulkách 3-3 a 3-4.

Tabulka 3-1 Chemické složení slitiny hliníku AlCu4MgTi

Obsah prvků ve slitině hliníku [%]							
Al	Si	Cu	Mn	Mg	Fe	Cr	Zn
94,43	0,15	4,3	0,10	0,24	0,29	0,01	0,1
Ti	Ni	Zr	Ca	Na	Bi	Sb	Ostatní
0,2	0,05	0,08	0,009	0,0057	0,0014	0,001	0,03

Tabulka 3-2 Chemické složení slitiny hliníku AlSi12

Obsah prvků ve slitině AlSi12 [%]							
Al	Si	Cu	Mn	Mg	Fe	Cr	Zn
	10,5-13,5	0,9	0,05-0,55	0,35	0,7	0,1	0,55
Ti	Ni	Pb	Cr	Sn	Ostatní	-	-
0,15	0,30	0,2	0,1	0,10	0,25	-	-

Tabulka 3-3 Fyzikální vlastnosti slitiny AlCu4MgTi

Hustota (20 °C) [kg.m ³]	Youngův modul [MPa]	Teplotní roztavnost [K ⁻¹]	Tepelná vodivost [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Teplota krystalizace [°C]	Elektrická vodivost [m.Ω ⁻¹ .mm ⁻²]
2770	72000	24,0.10 ⁻⁶	150	640 -550	23

Tabulka 3-4 Fyzikální vlastnosti slitiny AlSi12

Hustota (20 °C) [kg.m ³]	Youngův modul [MPa]	Teplotní roztavnost [K ⁻¹]	Tepelná vodivost [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Teplota krystalizace [°C]	Elektrická vodivost [m.Ω ⁻¹ .mm ⁻²]
2650	72000	21,0.10 ⁻⁶	150	574 - 582	23

3.3 Metodika výroby tvarových dílů

Byla vypracována a odzkoušená metodika výroby dílů. Připravený tvářecí stroj lis typ CBA 300/63 s nástrojem ohřátým na teplotu 200 °C. Dále bylo nataveno odpovídající množství příslušné taveniny čistého hliníku a vybraných slitin hliníku. Tavenina byla zahřátá na teplotu lité cca 720 °C. Před odlévání byla tavenina metalurgicky ošetřena rafinační solí T3 a byla změřena teplota termočlánkem NiCr-Ni a registrována digitálním termometrem GTH 1100. Takto ošetřené a odměřené množství taveniny bylo odlito do vtokové soustavy tvarového nástroje, opatřeného ochranným nástřikem. Po odlití ihned došlo k lisování taveniny v nástroji prostřednictvím tvarového razníku po určitou dobu 15 [s]. Po ztuhnutí taveniny je díl vyjmut prostřednictvím vyhazovače tvářecího stroje. Pro experimenty byly zvoleny tři hodnoty působící síly na taveninu v nástroji 700 000 [N], 1 000 000 [N] a 1 500 000 [N]. Na obr. 3.3 jsou uvedeny vyrobené díly ze slitin hliníku. Obr. 3.4 udává tvar a orientační rozměry vyrobených dílů.



Obr. 3.3 Vyrobené díly ze slitin hliníku



Obr. 3.4 Tvar zkoušených vzorků slitin Al.

3.3.1 Stanovení stažen hliníku

Během experimentů bylo potřebné si uvědomit, že při tuhnutí slitin hliníku vzniknou staženiny. Tyto staženiny musíme nahradit přídatkem objemu navíc. Objem této staženiny lze vypočítat na základě hustoty taveniny a hustotě slitiny v tuhém stavu. Teoretický výpočet objemu staženiny lze potom napsat jako:

$$V_t = V_z + V_s, \quad (3.1)$$

kde značí: V_t – objem taveniny;

V_z – objem ztuhlé slitiny;

V_s – objem staženiny.

S použitím zákona zachování hmotnosti lze napsat:

$$V_z \cdot \rho_z = V_t \cdot \rho_t, \quad (3.2)$$

kde značí: ρ_t – hustota taveniny za teploty tuhnutí;

ρ_z – hustotu ztuhlého kovu za teploty tuhnutí.

Slitina AlCu4MgTi má při teplotě tuhnutí 550 °C hustotu 2770 [kg.m⁻³], zatímco hustota taveniny za teploty 550 °C činí 2590 [kg.m⁻³]. Z rovnice (3.2) lze vyjádřit objem taveniny V_t . Po dosazení příslušných hodnot lze psát:

$$V_t = \frac{V_z \cdot \rho_z}{\rho_t} = \frac{2770}{2590} V_z = 1,069498 \cdot V_z = 1,07 \cdot V_z$$

Z toho plyne, že objem staženin tvoří necelých 7% objemu ztuhlé slitiny. Je proto nezbytně nutné s tímto zmenšením objemu dopředu počítat při stlačování taveniny, jinak by v průběhu experimentu došlo k náhlému poklesu síly od razníku tlačící na krystalizující taveninu.

3.3.2 Výpočet tlaku v dutině raznice

Dále v rámci návrhu metodiky byl proveden výpočet tlaku vyvinutého v dutině formy (resp. Raznici) Síla, kterou byla tavenina stlačena v dutině raznice byla nastavena na maximální, tj. $F = 700\,000\text{ [N]}$, $1\,000\,000\text{ [N]}$ a $1\,500\,000\text{ [N]}$. Dále byl proveden výpočet tlaku působícího na krystalizující vzorek taveniny podle vztahu:

$$p = \frac{F}{S}, \quad (3.3)$$

kde značí: p - tlak působící na vzorek taveniny [MPa];

F – sílu působící na taveninu [F];

S - plochu vzorku [mm^2].

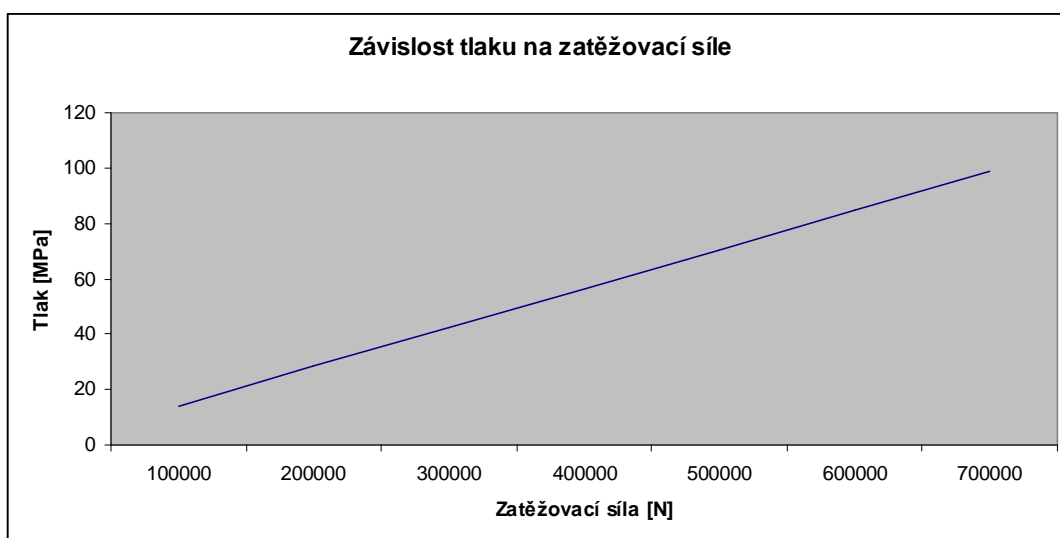
V tabulce 3-5 jsou přepočítány hodnoty tlaků, které postupně rostly s rostoucí silou působící na taveninu, jejíž maximální hodnota byla $700\,000\text{ [N]}$.

Tabulka 3-5 Tlaky působící na krystalizující taveninu slitiny hliníku

Síla [N]	100 000	200 000	300 000	400 000	500 000	600 000	700 000
Plocha [mm^2]	708800						
Tlak [MPa]	14,2	28,2	42,3	56,4	70,5	84,7	98,8

Tavenina po krystalizaci měla tvar komolého kužele a představovala tuhý masiv s rozměry, $H = 100\text{mm}$, průměr $D_1 = 100\text{[mm]}$, průměr $D_2 = 90\text{ [mm]}$. Silou zatížená plocha tváření (součet spodní a horní základny) představovala $S = 7088\text{ [mm}^2\text{]}$.

Z hodnot v tabulce 3-5 je vidět, jak se zvyšoval tlak působící na taveninu slitiny hliníku. Maximální síla při experimentu činila $700\,000\text{ [N]}$. Tlak na krystalizující taveninu dosáhl svého maxima při hodnotě 99 [MPa] . Na obr. 3.5 je grafická závislost tlaku na síle tvářecího nástroje.



Obr. 3.5 Grafická závislost tlaku na tlakové síle (max. $F = 700000$ [N])

3.4 Stanovení změny teploty tání při zvýšeném tlaku

V rámci řešení své diplomové práce jsem provedl orientační výpočet vlivu tlaku na změnu teploty tání čistého hliníku. Výpočet vychází z těchto známých hodnot: Hustota tuhého hliníku je 2680 [kg.m⁻³] při teplotě tání 660 [°C]. Hustota tekutého hliníku je 2550 [kg.m⁻³] při teplotě tání 660 °C; Molová entalpie tání hliníku $\Delta H_{\text{Tání}} = 10460$ [J.mol⁻¹] a $T_{\text{tání}} = 660 + 273 = 933$ [K].

1) výpočet molových objemů tuhého a kapalného zinku se vypočítá dle vztahu:

$$V_{(s)} = \frac{M_{al(s)}}{\rho_{al(s)}} = \frac{26,98}{2,680} \quad (3.4)$$

$$V_{(s)} = 10,07[\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}]$$

$$V_{(l)} = \frac{M_{al(l)}}{\rho_{al(l)}} = \frac{26,98}{2,55} = 10,58[\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}]$$

Po dosazení vypočítaných hodnot do rovnice:

$$\begin{aligned} \Delta V_{\text{přeměny}} &= V_{(l)} - V_{(s)} \\ \Delta V_{\text{přeměny}} &= 10,58 - 10,07 = 5,1 \cdot 10^{-7} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Základní výpočtová rovnice :

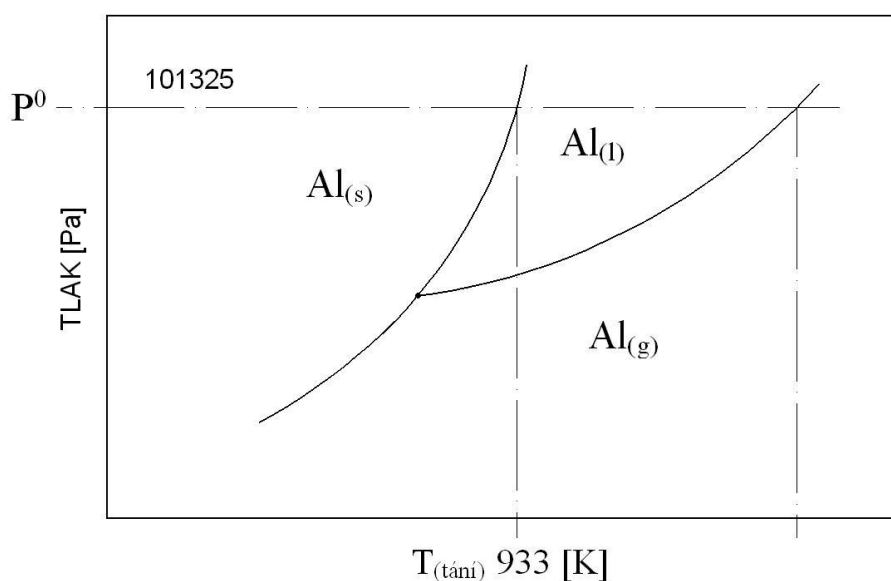
$$\frac{dP}{dT} = \frac{10460}{933 \cdot (10,57 - 10,07) \cdot 10^{-6}} = \frac{10460}{933 \cdot 0,00000051} \quad (3.6)$$

$$\frac{dP}{dT} = 22422292 [Pa \cdot K^{-1}]$$

Vypočítané směrnice tečny dP/dT přímky znázorňující fázovou rovnováhu tuhé fáze a taveniny je kladná, to znamená, že se zvyšováním celkového tlaku nad soustavou se bude teplota tání hliníku zvyšovat viz obr. 3.6.

Reciproční hodnota uvedeného výrazu:

$$\frac{dT}{dP} = \frac{933 \cdot 0,00000051}{10460} = 4,549 \cdot 10^{-8} [K \cdot Pa^{-1}] \quad (3.7)$$



Obr. 3.6 Fázová rovnováha - závislost tlaku na teplotě u čistého hliníku

Vyjádříme změny teploty tání při změně tlaku o 1 Pa, když se tlak zvýší o 10000 Pa pak:

$$\Delta T = 10000 \cdot (dT / dP) = 10000 \cdot (4,549 \cdot 10^{-8}) = 4,549 \cdot 10^{-4} [K] \quad (3.8)$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 4,549 \cdot 10^{-4} + 933 = 933,0004549 [K]. \quad (3.9)$$

Teplota tání hliníku se změní vlivem tlaku 10000 [Pa] o $4,549 \cdot 10^{-4}$ [K], tedy stoupne z teploty 660°C na teplotu 660,0004549 °C.

3.5 Hodnocení struktury hliníkových odlitků

Z odlitých zkušebních těles slitiny hliníku byly připraveny vzorky pro metalografické pozorování struktury, viz obr. 3.7.



Obr. 3.7 Příprava vzorku pro metalografické pozorování z vytvořeného dílu

Takto oddělené vzorky byly následně připraveny pro metalografické pozorování klasickým způsobem: zality do fenolické pryskyřice, broušeny na brusných papírech o zrnitosti 240, 320, 400 a 600, dále byly leštěny na plstěném kotouči za použití diamantové pasty.

Pro vyvolání struktury byl povrch vzorků leptán speciálně připraveným leptadlem 0,5% roztokem kyseliny fluorovodíkové v destilované vodě – 0,5%HF. Po naleptání byl vzorek připraven k pozorování jeho struktury pod světelným mikroskopem NEOPHOT 21 (výrobce Carl Zeiss Jena – SRN), viz obr. 3.8. Z metalografických vzorků byla vybrána místa z kterých byla sledována struktura. Struktura byla pozorována v laboratoři na Katedře technologie pomocí kamery připojené k mikroskopu NEOPHOT 21 a hodnocena softwarem NIS Elementas AR, viz obr. 3.7. při zvětšení 32x 100x a 500x. Jak již bylo uvedeno, vzorky byly vybrány z různých míst jednotlivých odlitků při různých tlacích působících na krystalizující taveninu slitin hliníku a různých průměrech z horní a dolní části odlitku tvaru rotačního komolého kužele, viz obr. 3.4. Přehled pozorovaných vzorků je uveden v tabulce 3-6 a získané struktury jsou v **příloze č. 1**



Obr. 3.8 Světelný mikroskop NEOPHOT 21 s kamerou Nikon a softwarem NIS Elements AR

Tabulka 3-6 Přehled vzorků pro metalografické metalografických výbrusů

Označení vzorku	Typ slitiny	Podmínky experimentu	
		Zatěžovací síla [N]	Průměr základny vzorku [mm]
V1	Al	100 0000	Ø 90
V2	Al	150 0000	Ø 90
V3	AlCu4MgTi	70 0000	Ø 100
V4	AlCu4MgTi	70 0000	Ø 90
V5	AlCu4MgTi	100 0000	Ø 100
V6	AlSi12	100 0000	Ø 90

Metalografické hodnocení vzorků bylo rozděleno do 3 oblastí. V první, jak je výše uvedeno, byla sledována metalografická struktura všech použitých vzorků (V1 až V6). Dále byla sledována u slitiny AlSi12, která je dendritické morfologie, vzdálenost sekundárních os dendritů (Dendrite arm spacing - DAS), k tomu byl použit výše uvedený mikroskop se software NIS Elementas, AR. Získané struktury a odpovídající hodnoty DAS jsou uvedeny níže v této kapitole. Třetí skupina metalografického pozorování byla zaměřena na sledování velikosti zrn slitin, k tomu byly použity vzorky (V1 až V5). Uvedené struktury a hodnoty velikosti zrn jsou též níže uvedeny.

Pro všechna metalografická pozorování na mikroskopu Neochot 21 byl použit software NIS Elementas, AR.

Pomocí tohoto software byl nasníman obraz struktury vyvolaný mikroskopem, poté byl uložen do souboru typu jp2, pak kalibrován (bylo přiřazeno měřítko), takto byly získány všechny struktury uvedené v příloze č. 1, kromě vzorku V6, slitina AlSi12. Pro vyhodnocení velikosti zrn byl obraz dále transformován pro prahování (označení oblastí zrn ze kterých byly určeny hodnoty: Area, EqDiameter, Circularity, MeasuredArea. Sledovaná zrna byla zvýrazněna jinou barvou prostřednictvím funkce programu NIS Elements, AR (byly odečteny hodnoty veličin Area, EqDiameter, Circularity, MeasuredArea). Zjištěné hodnoty jsou pro jednotlivé vzorky uvedeny níže tabulkách 3.8 až 3.15. Sledování hodnoty DAS, které bylo provedeno u slitiny AlSi12 (dendritická struktura) bylo hodnoceno pomocí softwaru NIS Elements, AR prostřednictvím funkce DAS včetně statistických výpočtů, **viz příloha č. 2**. Získané hodnoty DAS jsou v tabulce 3-18. V tabulce 3-7 jsou vysvětleny pojmy softwaru NIS Elementas, AR.

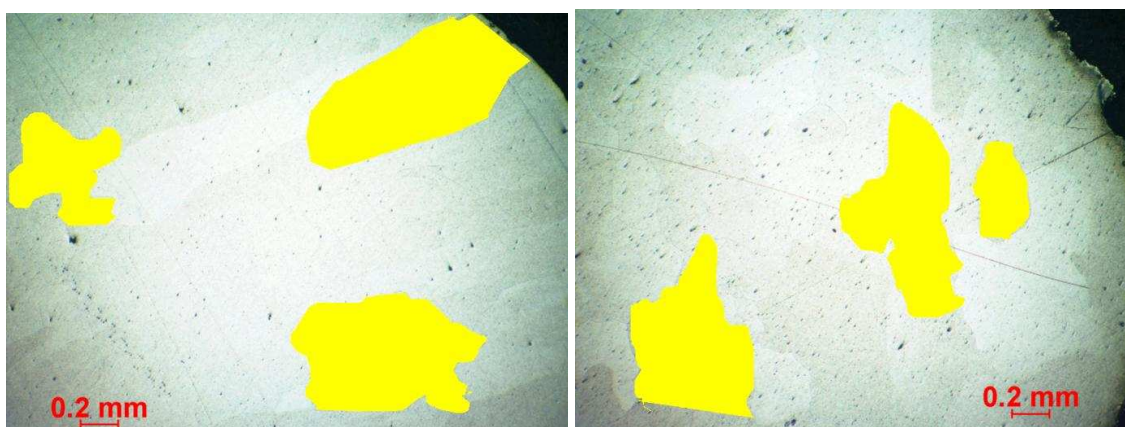
Tabulka 3-7 Přehled sledovaných veličin v programu NIS Elements, AR

Area (plocha)	Je hlavním kritériem velikosti. Nekalibrovaná – udává počet pixelů Kalibrovaná – udává reálnou plochu	
Circularity	Kruhovitost – udává míru tvaru kruhu a nabývá hodnot menších než 1, pro kruh by tedy hodnota byla rovna 1	$circularity = \frac{4\pi \cdot area}{perimeter(obvod)}$
EqDiameter	Udává hodnotu velikosti útvaru přepočtenou jako průměr kruhu o velikosti shodné jako útvar	
MeasuredArea	Měřená plocha je plocha masky uvnitř měřicího rámu, je-li aktivovaná maska (mask=on)	

Podrobnému hodnocení struktur je věnována následující podkapitola 3.5.1.

3.5.1 Hodnocení struktur hliníkových slitin

Z hodnocení získaných struktur hliníku a jeho slitin byly získány některé poznatky. Tak např. prahování slitiny AlCu4MgTi proběhlo s využitím programu NIS Elements, AR bez komplikací. Naopak při prahování čistého hliníku program nerozeznal hranice zrn, tím se musely hranice zrn označit manuálně. Pro ilustraci jsem přidal ke každému výsledku obrázek naprahovaného vzorku. Oblast je vyplněna žlutou barvou. Každý vzorek byl prahován na dvou místech pro ověření hodnot naměřených tímto softwarem. Výsledky prahování a sledování struktury hliníkových slitin AlCu4MgTi, AlSi12 a čistého hliníku jsou uvedeny v tabulkách 3-8 až 3-17, struktury jsou uvedeny na obr. 3.7 až 3.11. Dále jsou zpracovány závislosti naměřených parametrů pro zjištění odlišností ve vzorcích slitin hliníku.



Obr. 3.7 Metalografické pozorování čistého hliníku zatíženého silou 1000000 [N], vzorek odebrán ze základny Ø 90mm (vzorek V1)

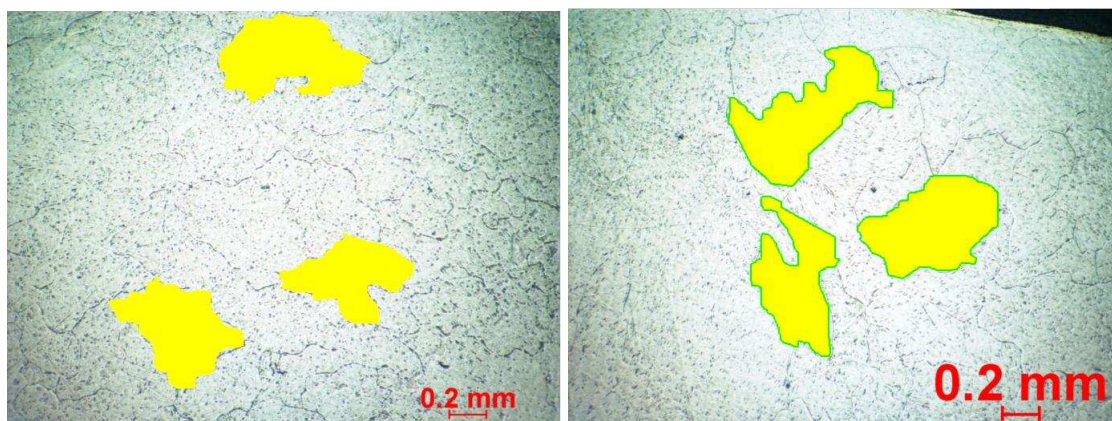
Tabulka 3-8 Naměřených hodnot čistého Al, vzorek V1, místo 1, zatížení silou 1000000 [N]

Vzorek – V 1	Střední hodnota [mm]	Směrodatná odchylka [mm]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
Area	0,4195	0,13937	0,22446	0,54157
EqDiameter	0,71895	0,1313	0,53459	0,83039
Circularity	0,53746	0,095021	0,41122	0,64028

MeasuredArea	6,796	0	6,796	6,796
---------------------	-------	---	-------	-------

Tabulka 3-9 Naměřených hodnot čistého Al, vzorek V1, místo 2, zatížení silou 1000000 [N]

Vzorek – V 1	Střední hodnota [mm]	Směrodatná odchylka [mm]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
Area	0,31026	0,13828	0,11477	0,41217
EqDiameter	0,60792	0,15959	0,38226	0,72443
Circularity	0,52248	0,077691	0,43429	0,62332
MeasuredArea	6,796	0	6,796	6,796



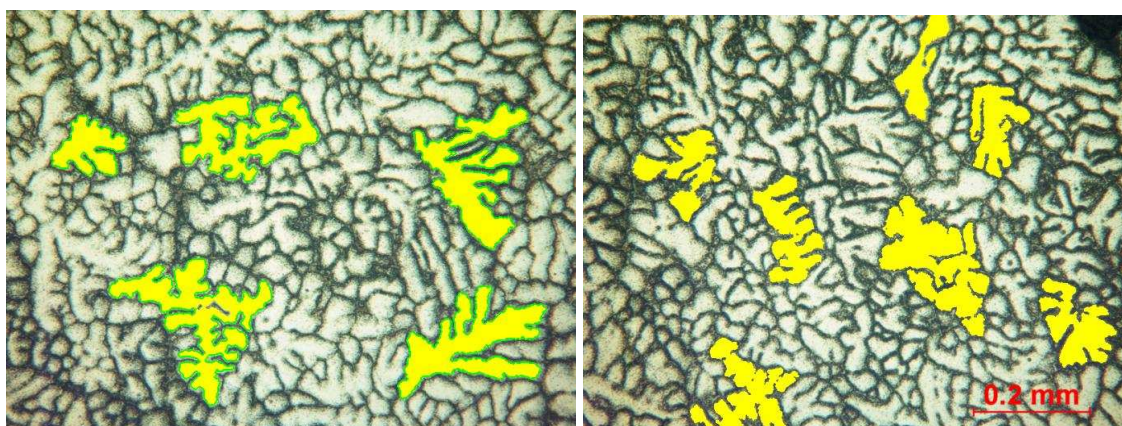
Obr 3.8 Metalografické pozorování čistého hliníku zatíženého silou 1500000 [N], vzorek odebrán ze základny Ø 90mm (vzorek V2)

Tabulka 3-10 Naměřených hodnot čistého Al, vzorek V2, místo 1, zatížení silou 1500000 [N]

Vzorek – V 2	Střední hodnota [mm]	Směrodatná odchylka [mm]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
Area	0,26423	0,027819	0,22552	0,28968
EqDiameter	0,57919	0,031091	0,53586	0,60731
Circularity	0,4146	0,12914	0,3098	0,59653
MeasuredArea	6,796	0	6,796	6,796

Tabulka 3-11 Naměřených hodnot čistého Al, vzorek V2, místo 2, zatížení silou 1500000 [N]

Vzorek – V2	Střední hodnota [mm]	Směrodatná odchylka [mm]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
Area	0,21949	0,025983	0,18554	0,24864
EqDiameter	0,5277	0,031633	0,48604	0,56265
Circularity	0,44602	0,033594	0,39852	0,4706
MeasuredArea	6,796	0	6,796	6,796



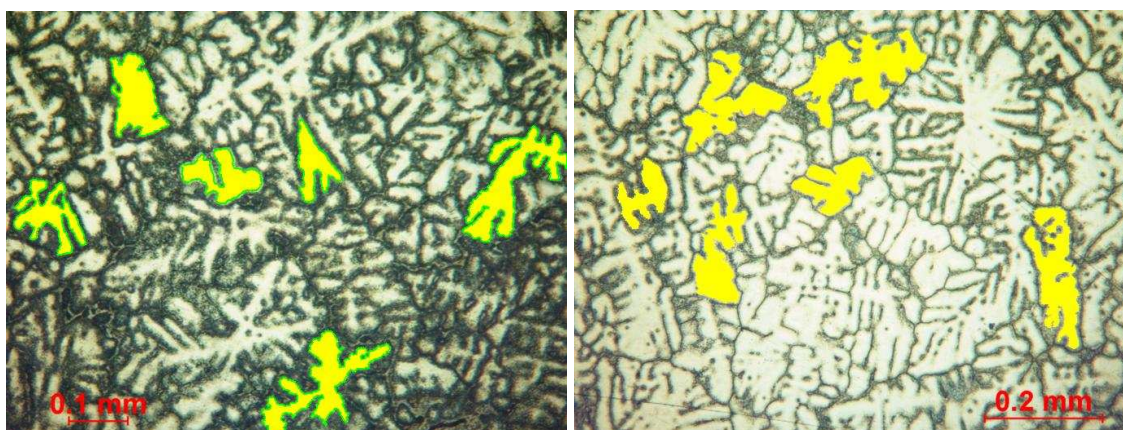
Obr. 3.9 Metalografické pozorování slitiny AlCu4MgTi zatížené silou 700000 [N]
vzorek odebrán ze základny Ø90mm (vzorek V4)

Tabulka 3-12 naměřených hodnot AlCu4MgTi, vzorek V4, místo 1, Zatížení silou 700000 [N]

Vzorek – V4	Střední hodnota [mm]	Směrodatná odchylka [mm]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
Area	0,015664	0,004606	0,0068233	0,020015
EqDiameter	0,13923	0,023642	0,093208	0,15964
Circularity	0,11177	0,06402	0,05604	0,23604
MeasuredArea	0,68815	0	0,68815	0,68815

Tabulka 3-13 naměřených hodnot AlCu4MgTi, vzorek V4, místo 2, Zatížení silou 700000 [N]

Vzorek – V4	Střední hodnota [mm]	Směrodatná odchylka [mm]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
Area	0,014564	0,0043318	0,0057469	0,020361
EqDiameter	0,11391	0,021793	0,085541	0,16101
Circularity	0,11316	0,035009	0,07895	0,1907
MeasuredArea	0,68815	0	0,68815	0,68815



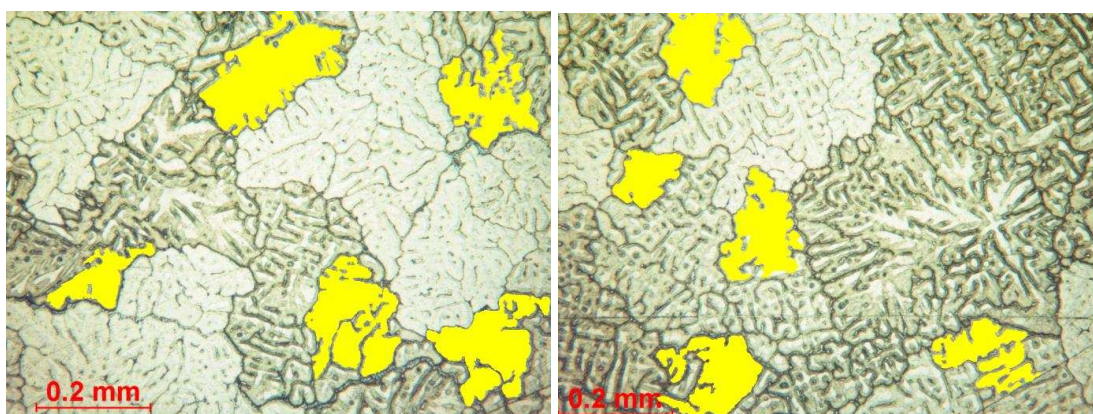
Obr 3.10 pozorování slitiny AlCu4MgTi zatížené silou 700000 [N] vzorek odebrán ze základny Ø100mm (vzorek V3)

Tabulka 3-14 naměřených hodnot AlCu4MgTi, vzorek V3, místo 1, Zatížení silou 700000 [N]

Vzorek – V3	Střední hodnota [mm]	Směrodatná odchylka [mm]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
Area	0,012339	0,0029736	0,0073262	0,014996
EqDiameter	0,12431	0,016041	0,096582	0,13818
Circularity	0,18523	0,11665	0,074197	0,40621
MeasuredArea	0,68815	0	0,68815	0,68815

Tabulka 3-15 naměřených hodnot AlCu4MgTi, vzorek V3, místo 2, Zatížení silou 700000 [N]

Vzorek – V3	Střední hodnota [mm]	Směrodatná odchylka [mm]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
Area	0,016732	0,0057241	0,0076096	0,024401
EqDiameter	0,14349	0,026712	0,098432	0,17626
Circularity	0,10653	0,035179	0,059138	0,15857
MeasuredArea	0,68815	0	0,68815	0,68815



Obr 3.11 pozorování slitiny AlCu4MgTi zatížené silou 1000000 [N] vzorek odebrán ze základny Ø100mm (vzorek V5)

Tabulka 3 -16 naměřených hodnot AlCu4MgTi, vzorek V5, místo 1, Zatížení silou 1000000 [N]

Vzorek – V 5	Střední hodnota [mm]	Směrodatná odchylka [mm]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
Area	0,0080357	0,0027684	0,0045899	0,011936
EqDiameter	0,099656	0,017324	0,076447	0,12328
Circularity	0,18343	0,089433	0,089217	0,30073
MeasuredArea	0,68815	0	0,68815	0,68815

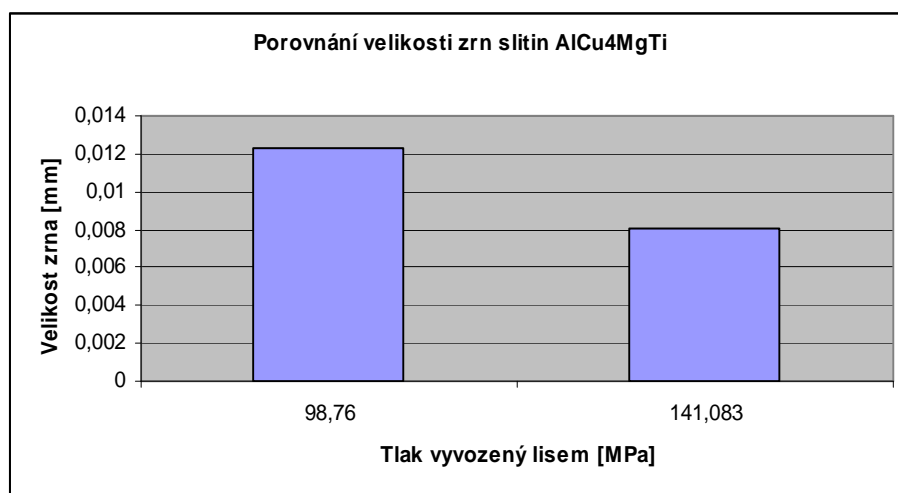
Tabulka 3 – 17 naměřených hodnot AlCu4MgTi, vzorek V5, místo 2, Zatížení silou 1000000 [N]

Vzorek – V 5	Střední hodnota [mm]	Směrodatná odchylka [mm]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
Area	0,008924	0,0031062	0,0045849	0,014143
EqDiameter	0,10492	0,018831	0,076405	0,13419
Circularity	0,15649	0,050696	0,095399	0,23074
MeasuredArea	0,68815	0	0,68815	0,68815

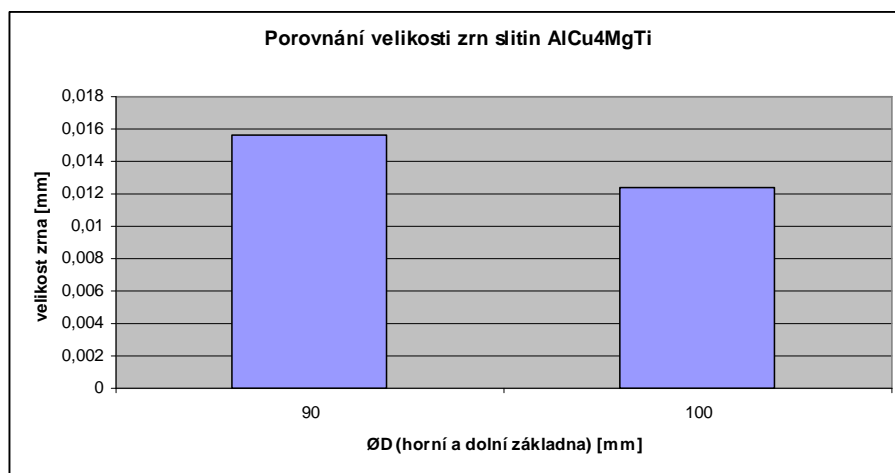
3.5.1.1 Porovnání hodnocených výsledků naměřených programem NIS

Elements, AR

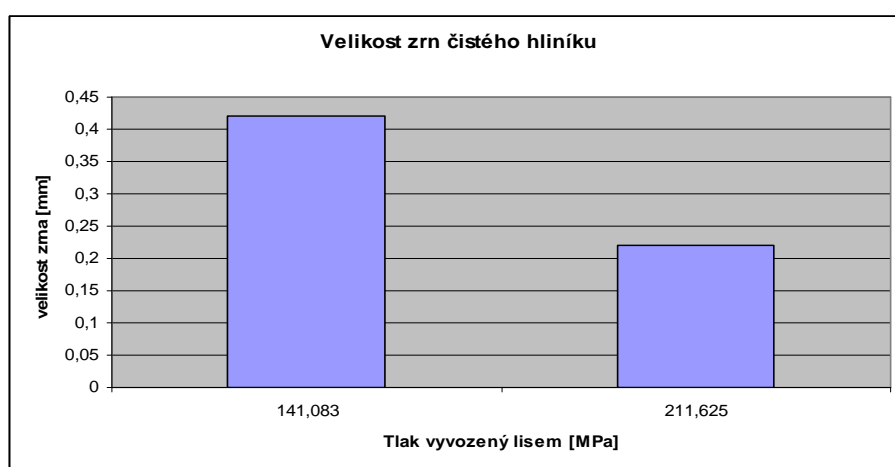
Vyhodnocení výsledků bylo provedené na základě stanovení velikosti zrn v závislosti na tlaku nástroje působícího na tuhnoucí taveninu příslušné slitiny a kruhovitosti struktury čistého hliníku. Získané výsledky jsou patrné z obr. 3.12 a ž 3. 15.



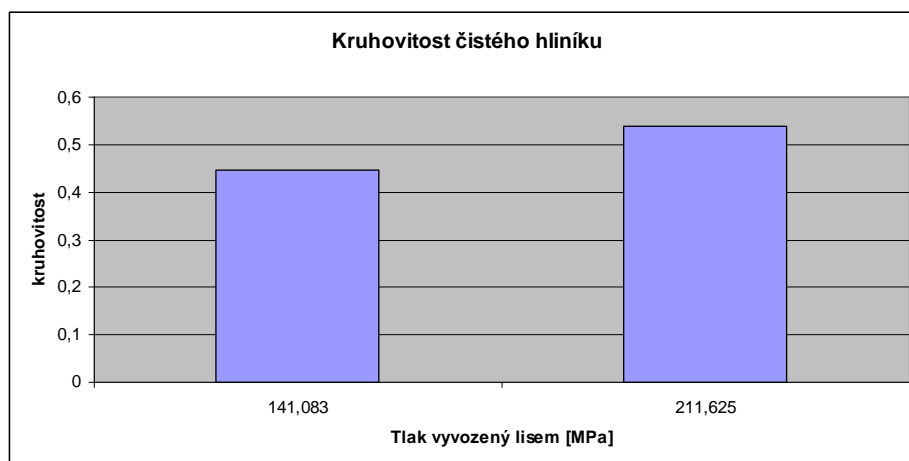
Na obr. 3.12 Velikost zrn slitiny AlCu4MgTi při síle 700000 [N] a 1000000 [N]



Na obr 3.13 Velikosti zrn slitiny AlCu4MgTi, při síle 700000 [N], na Ø 90 a 100 mm



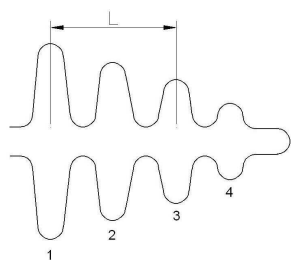
Na obr. 3.14 Velikosti zrn čistého hliníku, při tlaku 141 a 211 MPa



Obr. 3.15 Kruhovitost krystalů čistého Al, při tlaku 141 a 211 MPa

Z výše uvedených hodnot je patrné, že se rostoucím tlakem klesá velikost zrn. Současně je také potvrzeno, že s vyšší tlak přispívá k vyšší kruhovitosti zrn, čímž jsou podpořeny teoretické předpoklady.

Na vzorku AlSi12 bylo provedeno měření DAS na pěti místech, z každého místa bylo nalezeno a označeno 10 dendritických stromčků a vypočtena hodnota, tak jak je schematicky uvedeno na obr. 3.16.



$$DAS = L / (n-1)$$

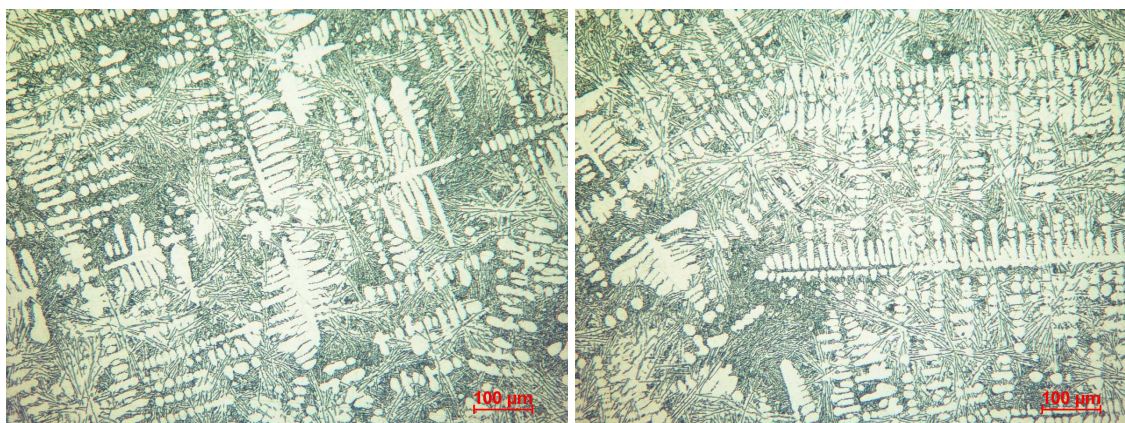
n – počet sekundárních os

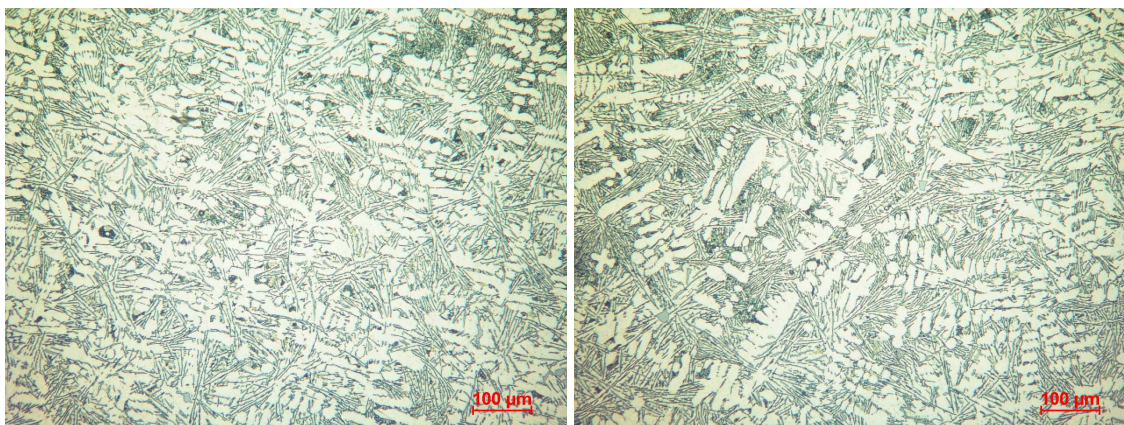
Obr. 3.16 Schéma vyhodnocení DAS

Vybrány byly opticky největší dendrity a z nich byla určena průměrná hodnota viz tabulka 3-18. Pro ilustraci zde uvádím obr. 3.17 s dendritickou strukturou a tabulku výsledků z pěti hodnocených míst. Výsledky všech měření budou uvedeny v **příloze č. 2**.

Tabulka 3-18 Výsledky hodnocení dendritické struktury

Slitina AlSi12			
Měřené místo	DAS = L / (n-1)	Minimum [μm]	Maximum [μm]
1	22,37	13,33	35,37
2	22,99	18,05	26,95
3	17,83	13,36	21,77
4	30,47	23,58	35,46
5	21,16	21,16	31,47





Obr. 3.17 Dendritická struktura vzorku AlSi12

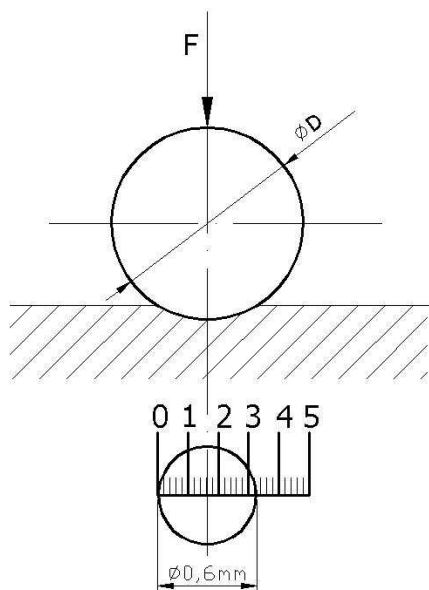
Naměřené dendritické struktury měly průměrné hodnoty DAS v rozsahu mezi 17,83 μm až 30,47 μm. Nejmenší naměřené vzdálenosti sekundárních os dendritů se objevily na prvním místě a měly hodnotu 13,33 μm zatímco nejvyšší hodnota činila 35,45 μm a byla naměřena v místě č.4. Průměrná hodnota DAS = 22,964.

3.6 Zkoušky tvrdosti hliníkových slitin

Na slitinách hliníku jsem prováděl zkoušky tvrdosti podle Brinella (ČSN 42 0371), podstatou tohoto principu je zatlačování ocelové kalené kuličky do vyleštěné plochy zkoušeného kovu konstantním zatížením kolmým na měřený vzorek, viz obr. 3.18 Následně je potom tvrdost vyjádřena známým vztahem:

$$HB = \frac{F}{S} = 0,102 \cdot \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (3.10)$$

kde značí: D – průměr kalené ocelové kuličky [mm];
 d – průměr vtisku do materiálu [mm];
 F – zatěžovací síla [kP,N].



Obr. 3.18 Schéma zkoušky tvrdosti podle Brinella.

Po vykonání zkoušky bylo třeba naměřit průměry vtisku, nebo jeho hloubku. Pomocí tzv. měřicího mikroskopu - měřicí Brinellovy lupy jsem naměřil průměr vtisku po kuličce s přesností na setiny mm. Měření hloubky vtisku by bylo pro mě obtížnější. Dnešní tvrdoměry jsou již konstruovány tak, že se hodnota průměru vtisku dá odečíst přímo na přístroji. Podle takto naměřených hodnot jsem potom odečetl v tabulce tvrdostí hodnoty a zapsal je do přehledné tabulky.

Na výsledky má vliv hlavně velikost zatížení, která se volí především s ohledem na průměr kalené kuličky a zkoušený materiál. Průměry kuliček mají hodnoty 10, 5, 2.5, 1.25, 0.625. Zatížení se volí podle vztahu $F = K \cdot D^2$. Koeficient K nabývá hodnot $K = 30$ (neželezné kovy a slitiny), $K = 10$ (měkké neželezné kovy), $K = 2,5$ (kompozice). Doba zatěžování je volena $t = 10s$ až $15s$ (oceli a slitiny) a u neželezných kovů podle materiálu $t = 10s$ až $180s$.

Jak jsem již uvedl, povrch zkoušeného materiálu musí být rovný, hladký a bez nečistot. Tloušťka nesmí být menší než osminásobek hloubky vtisku a vzdálenost středu vtisku od okraje by měla být minimálně $2,5D$ (oceli a slitiny) a $3D$ u neželezných kovů. Velikost vtisku by se měla pohybovat mezi hodnotami $0,25D$ až $0,6D$.

Zkouška tvrdosti byla prováděna na tvrdoměru VEB Werkstoffprüfmaschinen Leipzig (308/174) s maximální zatěžovací silou 250 kP, ročník výroby 1972, který je k dispozici na Katedře materiálů, FS - Technické univerzity v Liberci, viz **obr. 3.19**. Pro toto měření byla použita ocelová kalená kulička o průměru $d = 2,5mm$ se zatěžovací

silou 31,5 kP a 15,6kP po dobu 30s, jak je uvedeno v tabulkách pro zkoušení tvrdosti hliníkových slitin. Parametry zkoušky jsem uvedl do přehledné tabulky. Zkoušený vzorek byl ve tvaru rotačního komolého kužele s dolní základnou o poloměru 50mm a horní základnou 45mm o výšce 100mm uvedeného na obr. 3.4.

Tabulka 3-19 Přehled parametrů při zkoušce tvrdosti slitin hliníku podle Brinella

Zkouška tvrdosti dle Brinella (ČSN 42 0371)		
Průměr kuličky	Zatěžující síla	Doba působení
2,5 mm	31,5 kp 15,6 kp	30 s



Obr. 3.19 Měření tvrdosti na tvrdoměru VEB Werkstoffprüfmaschinen
Liepzig (308/174)

Hodnoty naměřených tvrdostí určených podle průměru vtisku a jak již bylo uvedeno odečteny z mikroskopu zabudovaném ve tvrdoměru viz obr. 3.20, hodnoty průměrů jsou odečteny z dvou úhlopříček a zprůměrnovány pro větší přesnost měření, následně je tvrdost odečtena z tabulky. Pro ověření správnosti naměřené hodnoty tvrdosti jsem s použitím vztahu (3.10) provedl ověřovací výpočet tvrdosti:

$$HB = \frac{F}{S} = 0,102 \cdot \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot 31,5}{\pi \cdot 2 \cdot [2^2 - (2^2 - 0,701^2)^{\frac{1}{2}}]} =$$

$$= 79,078 HB$$

Hodnota tvrdosti vypočtená podle výše uvedeného vzorce má velice podobný výsledek, jako tvrdost odečtená pro příslušné měření odečtená z tabulky. Proto další měření tvrdosti byly provedeny na základě stanovení průměrné hodnoty vtisku s použitím lupy Brinellova přístroje a tvrdost byla stanovena z tabulek. Na obr. 3.20 je uveden vtisk z lupy Brinellova přístroje.



Obr. 3.20 Lupa Brinellova přístroje

V tabulce 3.19 jsou naměřené tvrdosti slitiny AlCu4MgTi ze spodní a horní části odlitku zatíženého silou 70 0000 [N] od lisu při sledování krystalizace pod tlakem. Při měření tvrdosti byla použita zatěžovací síla 31,2 kP po dobu 30s.

Tabulka 3-19 Naměřené hodnoty tvrdosti odlitků ze slitiny hliníku AlCu4MgTi

Vtisk [mm]	Tvrdost [HB]	Směrodatná odchylka tvrdosti	Průměr základny odlitku
0,701	79,3	3,502261	Ø90
0,711	77,1		
0,686	82,9		
0,686	82,9		
0,668	87,5		
0,705	78,4		
0,661	89,4	4,345879	Ø100
0,641	95,2		
0,693	81,2		
0,675	85,7		
0,673	86,2		
0,678	84,9		

V tabulce 3-20 jsou naměřené tvrdosti slitiny AlSi12 ze spodní a horní části odlitku zatíženého silou 100t v lisu při sledování krystalizace. Při měření tvrdosti byla použita zatěžovací síla 31,2 kP po dobu 30s.

Tabulka 3-20 Naměřené hodnoty tvrdosti odlitků ze slitiny hliníku AlSi12

Vtisk [mm]	Tvrdost [HB]	Směrodatná odchylka tvrdosti	Průměr Základny odlitku
0,783	63,3	1,133843	Ø90
0,791	62,0		
0,772	65,1		
0,781	63,6		
0,790	62,1		
0,833	55,7	0,195959	Ø100
0,831	56,0		
0,832	55,8		
0,835	55,4		
0,832	55,8		

V tabulce 3-21 jsou naměřené tvrdosti slitiny AlCu4MgTi (odlitek č.2) ze spodní a horní části odlitku zatíženého silou 100t v lisu při sledování krystalizace. Při měření tvrdosti byla použita zatěžovací síla 31,2 kP po dobu 30s.

Tabulka 3-21 Naměřené hodnoty tvrdosti odlitků ze slitiny hliníku AlCu4MgTi

Vtisk [mm]	Tvrdost [HB]	Směrodatná odchylka tvrdosti	Průměr základny odlitku
0,671	86,8	1,013903	Ø90
0,682	83,9		
0,678	84,9		
0,681	84,2		
0,679	84,7		
0,678	84,9	1,532319	Ø100
0,682	83,9		
0,683	83,7		
0,673	86,2		
0,667	87,8		

V tabulce 3-22 jsou naměřené tvrdosti čistého hliníku Al (odlitek č.1) ze spodní a horní části odlitku zatíženého silou 100t v lisu při sledování krystalizace. Při měření tvrdosti byla použita zatěžovací síla 15,6 kP po dobu 30s.

Tabulka 3-22 Naměřené hodnoty tvrdosti čistého hliníku

Vtisk [mm]	Tvrdest [HB]	Směrodatná odchylka tvrdesti	Průměr základny odlitku
0,915	22,9	0,48	Ø90
0,908	23,3		
0,931	22,1		
0,928	22,3		
0,932	22,1		
1,049	17,2	0,811419	Ø100
1,084	16,1		
1,091	15,9		
1,041	17,5		
1,028	18		

V tabulce 3-23 jsou naměřené tvrdosti čistého hliníku Al (odlitek č.2) ze spodní a horní části odlitku zatíženého silou 150t v lisu při sledování krystalizace. Při měření tvrdosti byla použita zatěžovací síla 15,6 kP po dobu 30s.

Tabulka 3-23 Naměřené hodnoty tvrdosti čistého hliníku

Vtisk [mm]	Tvrdest [HB]	Směrodatná odchylka tvrdesti	Průměr základny odlitku
0,951	21,2	0,162481	Ø90
0,947	21,4		
0,943	21,5		
0,939	21,7		
0,945	21,5		
1,042	17,5	0,126491	Ø100
1,048	17,3		
1,047	17,3		
1,052	17,1		
1,046	17,3		

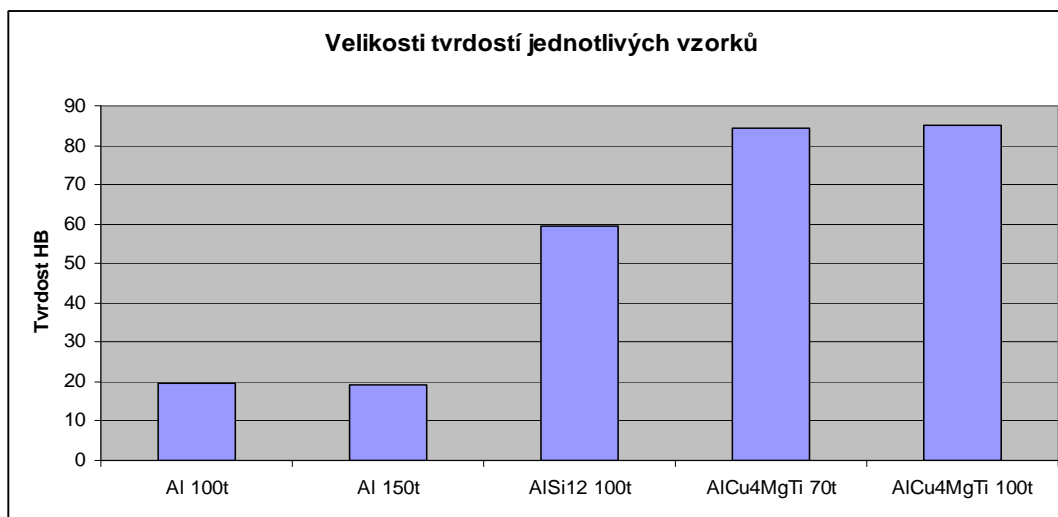
Poznámka: Podle tvrdosti se dá dle předepsané závislosti spočítat i mez pevnosti v tahu či mez kluzu. Pro tento přepočet používáme jednoduchý vzorec: $Re = k \cdot HB$ (pro mez pevnosti v tahu), kde pro hliníkové slitiny používáme konstantu $k = 2,6$.

Shrnutí výsledků tvrdosti slitin Al

Na základě naměřených hodnot tvrdostí každého vzorku byl vypočítán aritmetický průměr a směrodatná odchylka, výsledky jsou uvedeny v tabulce 3-24. Nejtvrdší je slitina AlCu4MgTi zatížená silou 100t, její tvrdost je v průměru asi 85,1 HB. Další podobně tvrdá je slitina AlCu4MgTi, zatížená silou 70t, její tvrdost dosahuje hodnot 84,225 HB. Slitina AlSi12 má tvrdost podstatně menší, než první dvě, a to 59,48 HB. Nejmenší tvrdosti vykazují vzorky čistého hliníku pro které je tvrdost HB = 19,74 (zatíženo 100t) a HB = 19,38 (zatíženo 150t), viz tabulka 3-24 a obr. 3.21.

tabulka 3-24 hodnoty naměřených tvrdostí hodnocených hliníkových vzorků

Slitina	Al (1000000 [N])	Al 150t	AlSi12 100t	AlCu4MgTi 70t	AlCu4MgTi 100t
Průměrná tvrdost [HB]	19,74	19,38	59,48	84,225	85,1



Obr. 3.21 Hodnoty tvrdostí jednotlivých pozorovaných vzorků

4. DISKUSE VÝSLEDKŮ

V této diplomové práci byly řešeny vlivy tlaku na krystalizující slitiny hliníku od zatížení hydraulickým lisem CBA 300/63 na strukturu slitin hliníku. Z výsledků je zřejmé, že jemnozrnnější struktura se objevuje u vzorků, které byly vystaveny vyššímu zatížení a tím i vyššímu tlaku.

V této souvislosti je nutno konstatovat, že diplomová práce zaměřená na sledování struktury po krystalizaci pod tlakem nebyla na Katedře strojírenské technologie ještě řešena. Tato práce je prvotní a s tímto vědomím je nutno přijímat dosažené výsledky. Bylo nutno stanovit metodiku výroby dílů, resp. odlitků ze slitin hliníku a současně bylo nutno vypracovat i metodiku hodnocení krystalizace pod tlakem.

Některé práce, např. DZUGAS a GRIGEROVÁ [X], experimentovaly s krystalizací slitin pod tlakem pomocí tvářecího lisu na větších odlitcích, tím do jisté míry eliminovaly vliv ochlazovací schopnosti formy, ale tím byly v některých případech vytvořeny i tepelné podmínky pro vznik dendritické struktury ve vzorcích odlitku, což není zcela typické pro odlitky lité pod vysokým tlakem. Nespornou výhodou této metody lití je, že se během krystalizace pod tlakem tavenina není vystavena proudění uvnitř formy a vlivem tlaku se eliminuje tvorba porózy.

Sledování bylo zaměřeno na několik odlitků, na kterých byla dále sledována a hodnocena struktura na dvou místech z každého z nich, dále byl experimentálně sledován vliv tvrdosti na velikost zatížení od lisu.

A) Při experimentu s pomocí softwaru NIS ELEMENTS AR vyhodnoceny struktury hliníkových slitin. Hodnocen byl celkový podíl plochy zrn u slitin. S tímto softwarem je možné hodnotit specifické parametry vzorku (např. texturální měření, měření v rámečku, ale i vyhodnocení včetně statistického výpočtu hodnot). Jedním z cílů mé diplomové práce bylo stanovit metodiku hodnocení experimentálních vzorků slitin a jejich struktur. Protože se vzorky shodovaly ve velikosti zatížení a v průměru jedné ze základů a ne všechny vzorky měly stejné chemické složení, rozhodl jsem se po konzultaci pozorovat jen některé veličiny (např. Area, Eqdiameter nebo Circularity). S tímto hodnocením ve značné míře souvisí také kvalita přípravy metalografických vzorků, které vyžadují velmi jemné vyleštění za

použití diamantové pasty. Jedná se zejména o vzorky čistého hliníku. Z výsledků naměřených softwarem je zřejmé, že s rostoucím zatížením průměr ekvivalentního průměru (plocha objektu nahrazena plochou kruhu o určitém průměru) klesá a struktura vykazuje jemnozrnější charakter. U čistého hliníku je pokles ekvivalentního průměru rapidnější než u slitiny AlCu4MgTi.

B) Měření tvrdosti proběhlo na stroji VEB Werkstoffprüfmaschinen Leipzig (308/174) a byla hodnocena spodní a horní základna každého z pěti zkušebních odlitků. Aby výsledky co nejvíce odpovídaly skutečnosti byli provedeny za optimálních podmínek podle normy ČSN 42 0371. Hodnocení tvrdosti se v každém z vzorků značně lišilo díky jinému chemickému složení odlitků. Abych mohl hodnotit vliv technologických parametrů, jako jsou vliv tlaku zatěžujícího lisu na tvrdost, musel jsem odečíst a porovnat hodnoty na vzorku se stejným chemickým složením. Jednalo se o čistý hliník a slitinu AlCu4MgTi. Každý z těchto vzorků byl vystaven při krystalizaci zatížení 100 a 150 tun, což odpovídá tlaku 141,083 a 211,625 MPa. Tvrdosti se vlivem tlaku rapidně nezměnily. Nejtvrdší ze zkoumaných vzorků byla slitina AlCu4MgTi a „nejměkčí“ byl čistý hliník, což se shodovalo s mými předpoklady.

C) Další experiment byl zaměřen na stanovení velikosti DAS (Dendrite arm sparing). Sledována byla slitina AlSi12 zatížená silou 100t pro kterou je specifická tvorba dendritické struktury při sledování krystalizace pod tlakem. Měření bylo provedeno na pěti místech každého zkušebního vzorku a byly odečteny průměrné hodnoty spočítané přímo softwarem NIS ELEMENTS AR. Hodnoty DAS se pohybovaly v rozsahu mezi 17,83 μm až 30,47 μm .

5. ZÁVĚR

Úkolem mé diplomové práce bylo sledování krystalizace slitin hliníku zatížených silou hydraulického lisu. Práce je rozdělena do dvou hlavních částí:

Teoretická část, která obsahuje problematiku sledování krystalizace taveniny za vyššího tlaku a vysvětluje podstatu vzniku krystalizačního zárodku v závislosti na vyšším tlaku. Dále je zde popsána výroba hliníku, vlastnosti slévárenských slitin hliníku, metalurgie hliníkových slitin a nové metody výroby odlitků ze slitin hliníku.

V experimentální části byly pokusy zaměřeny na sledování krystalizace slitin hliníku AlCu4MgTi , AlSi12 a krystalizace čistého hliníku pod tlakem v závislosti na zatížení krystalizující taveniny lisem CBA 300/63 v rozmezí (700000,1000000,1500000 N) a na zkoušky tvrdosti vzorků v závislosti na zatěžovací síle lisu. Hodnocen byl ekvivalentní průměr fáze slitin a velikost zrna čistého hliníku. Dále byla u slitiny AlSi12 hodnocena vzdálenost sekundárních os dendritů (DAS).

Z této diplomové práce lze na základě naměřených výsledků konstatovat tyto závěry:

- 1) Vypracovaná metodika pro zhotovení dílů krystalizací pod tlakem odpovídá možnostem, které jsou na Katedře strojírenské technologie TU v Liberci, s tím úzce souvisí i možnosti přípravy taveniny a jejího metalurgického ošetření před odléváním.
- 2) Pro vyhodnocení struktur hliníkových slitin v závislosti na zatěžovací síle v různých místech odlitku se použil optický mikroskop NEOPHOT 21 výrobce: výrobce Carl Zeiss Jena s kamerou NIKON a softwarem NIS ELEMENTS AR.
- 3) Hodnocené střední hodnoty ekvivalentního průměru fází slitin hliníku nabývají hodnot od 0,13923mm do 0,099656mm. S rostoucím zatížením se hodnoty snižují a struktura je jemnozrnější.
- 4) Zkoušky tvrdosti nám dokázaly, že vliv zatížení od hydraulického lisu při krystalizaci nemá podstatný vliv na naměřené hodnoty i když se v malé míře liší. Čistý hliník má oproti slitinám hliníku podstatně menší tvrdost. Pro vzorky V1 a V2 se pohybovaly hodnoty tvrdosti $\text{HB} = (16,1 \text{ až } 23,3)$. Slitina

AlSi12 (vzorek V6) měla naměřenou tvrdost HB = 59,48 a slitina AlCu4MgTi (vzorek V5) zatížena silou 150t byla „nejtvrdší“ HB = 85,1.

- 5) Měření vzdálenosti sekundárních os dendritů (DAS) u dendritické struktury slitiny AlSi12 v softwaru NIS ELEMENTS AR nám vyhodnotil výsledky v rozmezí od 13,33 μm do 35,45 μm . průměrná vzdálenost sekundárních os dendritů je 22,964 μm .

Pro přesnější řešení dané problematiky by bylo zapotřebí experimentovat s větším množstvím vzorků slitin hliníku a zaměřit se i na jiné slitiny které nejsou naměřeny a zpracovány v této diplomové práci. To však nebylo v této době možné, neboť pracovní nástroj musel být z důvodu špatné výroby vyhazovače opraven výrobcem po krátké době jeho používání.

Z důvodu, že práce je zaměřena spíše na základní výzkum, nebylo provedeno ekonomické hodnocení přínosu řešení práce.

6. Seznam použité literatury

- [1] KOLEKTIV: Příručka o hliníku. 1. vyd., Praha 1969.
- [2] GRÍGEROVÁ, T., KOŘENÝ, R., LUKÁČ, I.: Zlívárénstvo neželezných kovov. 1.Vyd., Bratislava/Praha 1988.
- [3] PLUHAŘ, J., PUŠKÁR, A., KOUTSKÝ, J., MACEK, K., BENEŠ, V.: Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu. 1. vyd., Praha 1987.
- [4] ŠEBL, J.: Lití kovů pod tlakem. 1. vyd., Praha 1961.
- [5] VETIŠKA, A. a kol.: Teoretické základy slévárenské technologie. 2. vyd., Praha 1974.
- [6] FIALA, J., MENTL, V., ŠUTTA, P.: Struktura a vlastnosti materiálů. 1. vyd., Praha 2003
- [7] PŘIBIL, J., VETIŠKA, A.: Teorie slévárenství. VUT Brno, 1963.
- [8] MOHYLA, M.: Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu. 1. vyd., Ostrava 1983
- [9] NOVÁKOVÁ, I., NOVÁ, I., HOŠEK, Z., EXNER, J.: Vliv tlaku na krystalizaci odlitků ze slitin hliníku. In: Mezinárodní konference PRO-TFECH-MA, Acta Mechanica Slovaca Košice, roč. 82-B/2004, s. 313 až 317. ISSN 1335-2393.
- [10] GRÍGEROVÁ, T., GREGUŠ, D., KOZEL, Š.: Príspevok k štúdiu struktury doeutektického siluminu. In: Sborník z vědecké konference. VŠB Ostrava 1990. s. 210 až 216.
- [11] VILČKO, J., DZUGAS, P.: Liatie s tuhnutím pod tlakom odlitkov zo Zlatin typu Al-Si – úvod do problematiky technologie výroby vysokokvalitných odliatkov (část I). Slévárenství XXXVII 1990, č. 12, s. 499 až 504.
- [12] PTÁČEK, L.: Slitiny hliníku na odlitky. Slévárenství, XLVII, 1999, č. 1, s. 1 až 13. ISSN 0037-6825.
- [13] KADLÁČEK, V., PTÁČEK, J.: Tavení a rafinace hliníku. Slévárenství, LIII 2005, č. 2/3, s. 79 až 84.
- [14] MICHNA A KOL. : Encyklopedie hliníku, Praha 2005
- [15] SILBERNAGEL, A.: Struktura a vlastnosti kovových materiálů. Kovosil Ostrava 2004.
- [16] JANDOŠ, F., ŘÍMAN, R., GEMPERLE, A.: Využití moderních laboratorních metod v metalografii. 1.vyd., SNTL Praha 1985.

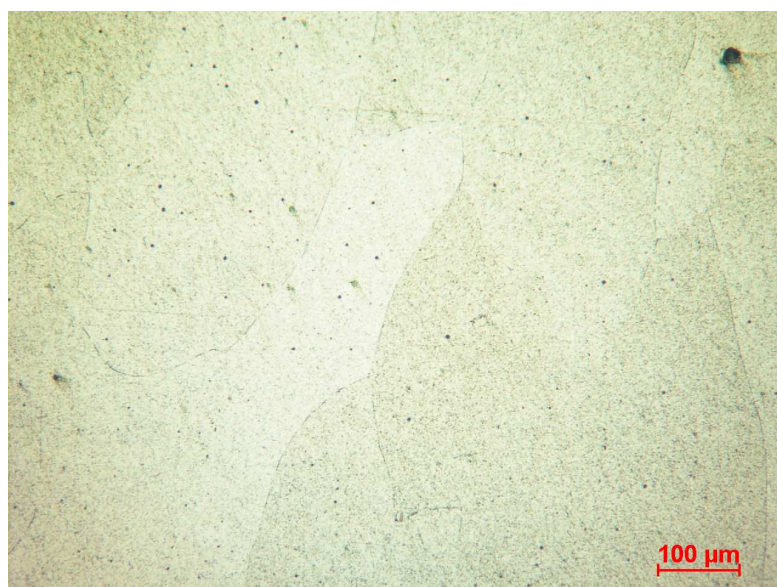
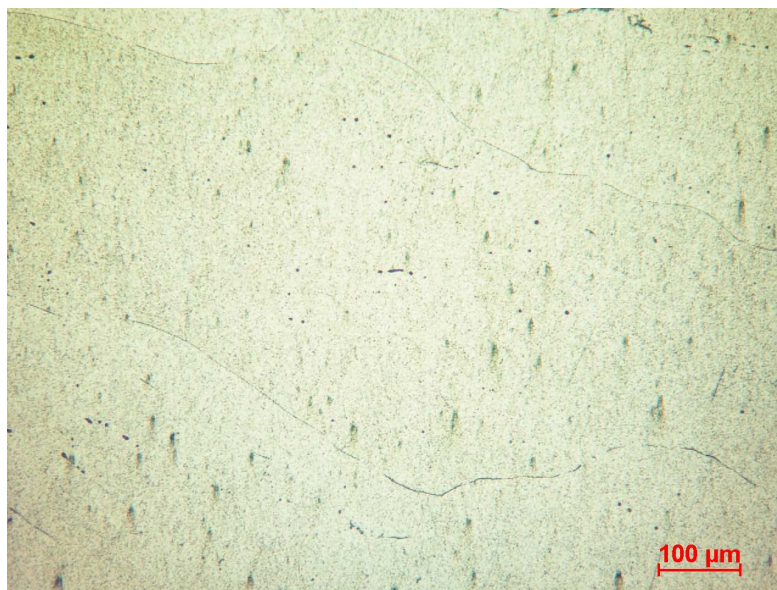


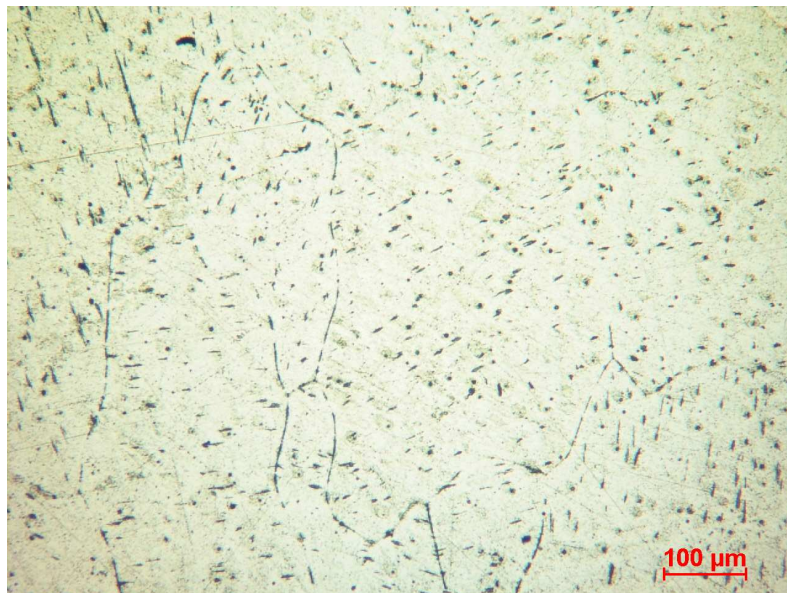
P Ř Í L O H A

Příloha č. 1

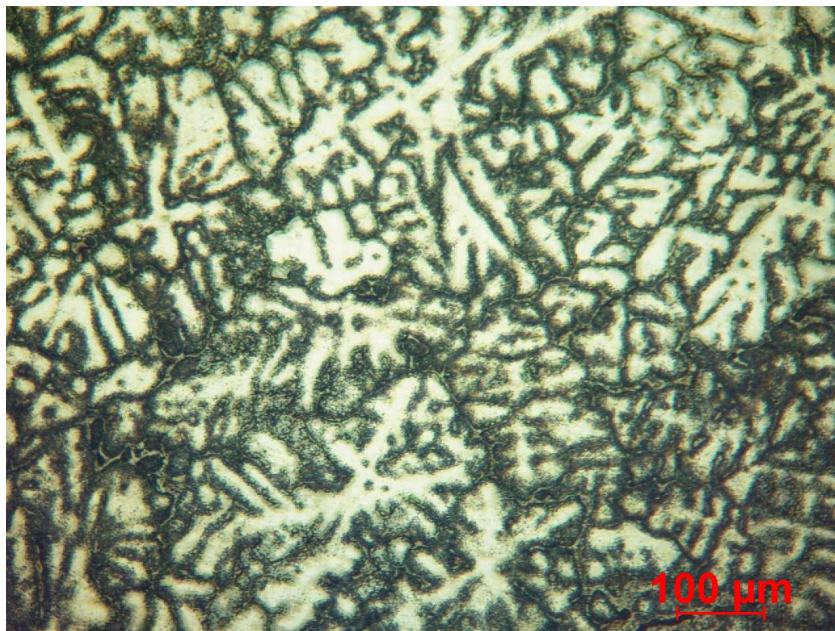
Metalografické hodnocení vzorků pomocí světelného mikroskopu Neophot 21

Vzorek V 1 – čistý hliník, zvětšení 100 x

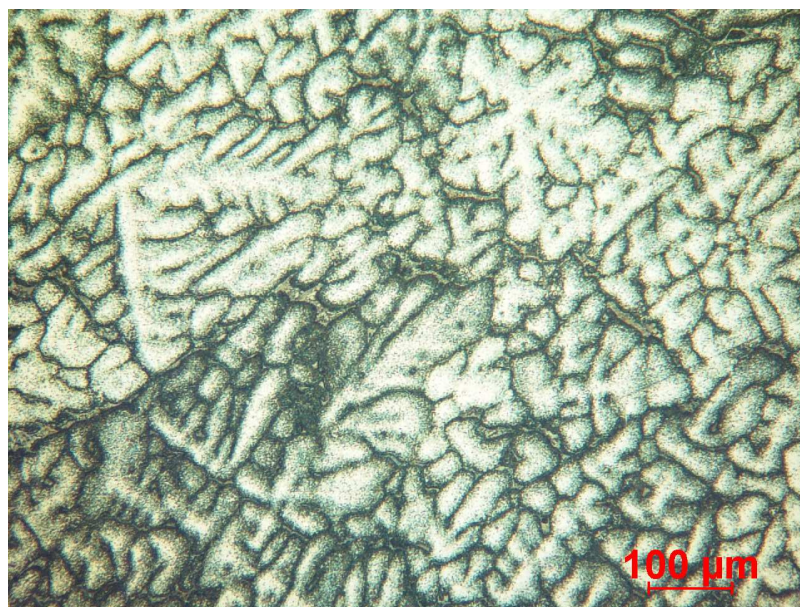
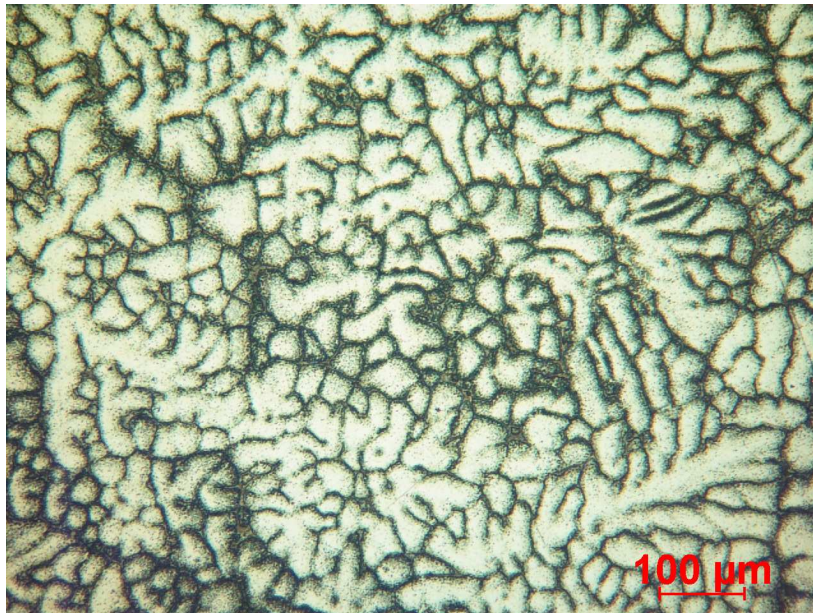


Vzorek V 2 – čistý hliník, zvětšení 100 x

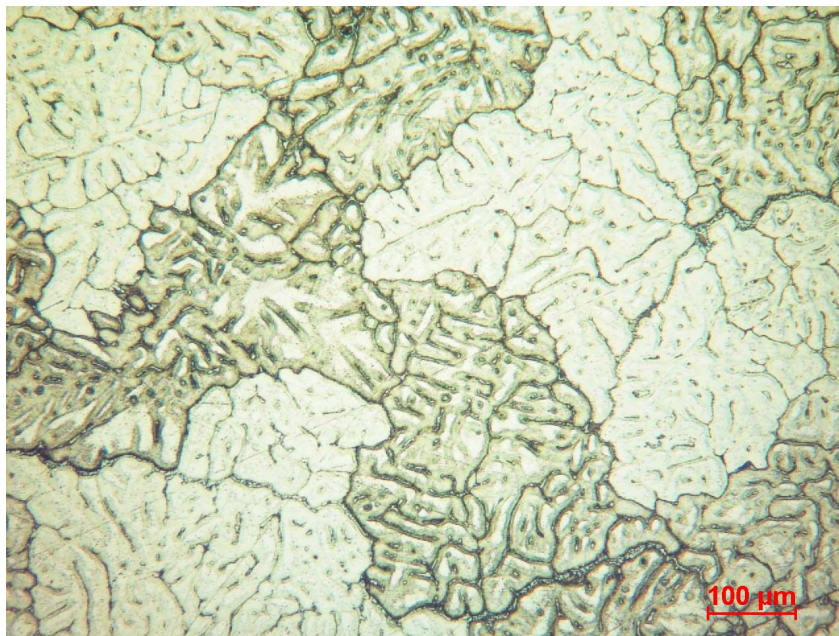
Vzorek V 3 – Slitina AlCu4MgTi, zvětšení 100x

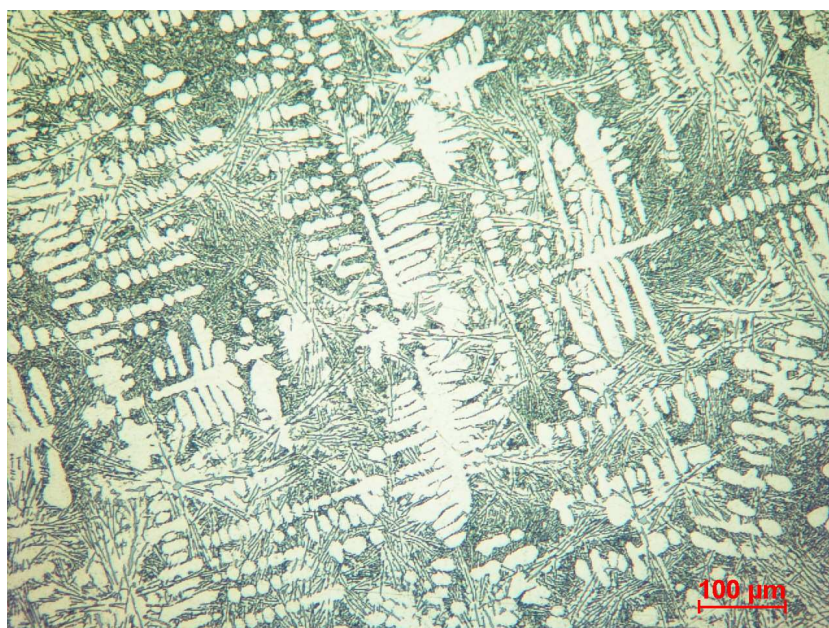


Vzorek V 4 – Slitina AlCu4MgTi, zvětšení 100x



Vzorek V 5 – Slitina AlCu4MgTi, zvětšení 100x



Vzorek V 6 – Slitina AlSi12, zvětšení 100x

Příloha č. 2

Měření dendritické struktury slitiny AlSi12 pomocí programu NIS ELEMENTS AR

Místo 1

DAS = 22,37 (6,02) / 10 měř. - min: 13,33 / max: 35,37 [μm]					
Idx.	DAS [μm]	L [μm]	N	Datum	Pozn. k měření
1	21,42	149,97	7	11.5.2010 8:25:26	
2	13,33	119,99	9	11.5.2010 8:26:15	
3	17,27	207,27	12	11.5.2010 8:26:34	
(4)	14,74	44,21	3	11.5.2010 8:29:03	
5	27,00	188,98	7	11.5.2010 8:29:35	
6	23,17	208,56	9	11.5.2010 8:29:53	
7	19,60	195,98	10	11.5.2010 8:30:19	
8	25,57	255,70	10	11.5.2010 8:30:52	
9	35,37	353,70	10	11.5.2010 8:31:17	
10	19,66	176,98	9	11.5.2010 8:31:39	
11	21,31	149,15	7	11.5.2010 8:32:04	

Místo 2

DAS = 22,99 (2,60) / 10 měř. - min: 18,05 / max: 26,95 [μm]					
Idx.	DAS [μm]	L [μm]	N	Datum	Pozn. k měření
1	22,46	224,59	10	11.5.2010 8:42:47	
2	18,05	126,38	7	11.5.2010 8:44:16	
3	20,78	228,57	11	11.5.2010 8:44:20	
4	25,28	176,97	7	11.5.2010 8:44:34	
5	23,78	285,36	12	11.5.2010 8:44:45	
6	20,96	146,72	7	11.5.2010 8:45:01	
7	22,85	228,50	10	11.5.2010 8:45:10	
8	23,49	187,94	8	11.5.2010 8:45:15	
9	25,27	202,17	8	11.5.2010 8:45:24	
10	26,95	188,64	7	11.5.2010 8:45:33	

Místo 3

DAS = 17,83 (2,71) / 10 měř. - min: 13,36 / max: 21,77 [μm]					
Idx.	DAS [μm]	L [μm]	N	Datum	Pozn. k měření
1	16,17	210,18	13	11.5.2010 8:49:24	
2	21,77	239,44	11	11.5.2010 8:49:34	
3	13,36	146,95	11	11.5.2010 8:49:42	
4	19,35	193,50	10	11.5.2010 8:50:04	
5	20,48	225,30	11	11.5.2010 8:50:15	
6	20,46	204,55	10	11.5.2010 8:50:27	
7	18,24	182,37	10	11.5.2010 8:50:40	
8	14,80	192,42	13	11.5.2010 8:50:55	
9	17,00	118,98	7	11.5.2010 8:51:41	
10	16,67	199,99	12	11.5.2010 8:51:53	

Místo 4

DAS = 30,47 (3,63) / 10 měř. - min: 23,58 / max: 35,46 [μm]					
Idx.	DAS [μm]	L [μm]	N	Datum	Pozn. k měření
1	30,85	215,95	7	11.5.2010 8:54:12	
2	26,03	364,40	14	11.5.2010 8:54:27	
3	23,58	165,08	7	11.5.2010 8:54:35	
4	31,22	374,66	12	11.5.2010 8:54:44	
5	27,61	358,95	13	11.5.2010 8:54:50	
6	32,28	258,24	8	11.5.2010 8:55:07	
7	33,48	234,33	7	11.5.2010 8:55:13	
8	32,43	324,32	10	11.5.2010 8:55:47	
9	31,74	190,46	6	11.5.2010 8:55:54	
10	35,46	283,70	8	11.5.2010 8:55:59	

Místo 5

DAS = 21,16 (5,00) / 10 měř. - min: 12,14 / max: 31,47 [μm]					
Idx.	DAS [μm]	L [μm]	N	Datum	Pozn. k měření
1	20,15	261,94	13	11.5.2010 8:58:27	
2	17,03	187,34	11	11.5.2010 8:58:31	
3	20,16	262,14	13	11.5.2010 8:58:35	
4	23,31	279,67	12	11.5.2010 8:58:42	
5	21,38	235,13	11	11.5.2010 8:58:55	
6	19,77	197,66	10	11.5.2010 8:59:17	
7	21,61	194,46	9	11.5.2010 8:59:28	
8	31,47	251,73	8	11.5.2010 8:59:34	
9	24,59	172,12	7	11.5.2010 8:59:48	
10	12,14	133,54	11	11.5.2010 9:00:04	